

Черкаський державний технологічний університет  
Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КОВАЛЕНКО ЮРІЙ ІВАНОВИЧ**

УДК 621.9.048.7(043.3)

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ПІДВИЩЕННЯ ЯКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧНИХ**  
**ЕЛЕМЕНТІВ КОМБІНОВАНОЮ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЮ**  
**ОБРОБКОЮ**

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за  
спеціальністю 05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:  
\_\_\_\_\_ Ю.І. Коваленко

Науковий керівник: **Антонюк Віктор Степанович**  
доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

## Анотація

Коваленко Ю.І. Підвищення якісних характеристик оптичних елементів комбінованою електронно-променевою обробкою – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.03.07 “Процеси фізико-технічної обробки”. – Черкаський державний технологічний університет Міністерства освіти і науки України, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

Одним із пріоритетних напрямків подальшого розвитку науково-технічного та соціально-економічного стану держави є розробка та удосконалення оптичних приладів та систем різноманітного призначення. Особливе значення оптичні пристрої набули в галузях зв’язку та телекомунікацій, точного машино- та приладобудування, аерокосмічній галузі, при виробництві квантових обчислювальних пристроїв, у медицині тощо.

З поступовим зростанням вимог до тонких покриттів на оптичних матеріалах (висока адгезійна міцність покриття на осаджує мій поверхні, висока корозійна стійкість, оптична однорідність) виникає необхідність у розробці нових та вдосконалені уже існуючих традиційних технологій, які б забезпечували необхідні властивості поверхні оптичних елементів.

Найпоширенішим матеріалом для виготовлення елементів цих пристроїв залишається оптичне скло. Основними методами модифікування поверхні силікатного скла в оптичній промисловості залишаються механічне, хімічне, теплове оброблення, а також комбінація цих методів. Серед існуючих теплових методів поверхневого оброблення оптичного скла перспективним є метод стрічкового електронно-променевого оброблення, основними перевагами якого є висока точність та швидкість оброблення, широкий діапазон робочих режимів, здатність термічного та електронного впливу лише на поверхневий

шар скла. При цьому можливе створення поверхні з новими фізико-хімічними та експлуатаційними властивостями.

Разом з тим, питання досягнення високих характеристик якості оптичних елементів (стан поверхні, їх зносостійкість та оптичні властивості), особливо при їх експлуатації в екстремальних умовах (глибокого вакууму, критичних температур та тисків, підвищених рівнів вологості, забрудненості та радіоактивності) на сьогоднішній час залишаються не вирішеними.

Іншим не розкритим технічним питанням залишається необхідність гнучкого контролю та регулювання енергетичними параметрами електронно-променевого оброблення безпосередньо під час проведення технологічного циклу. Це дозволило б за зміною розподілу електричних та теплових полів корегувати вплив електронного потоку на модифіковану поверхню.

У вступі розкрито суть та стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, наведені дані щодо наукової новизни, обґрунтована достовірність та показана практична цінність отриманих наукових результатів, наведені дані про публікації та апробацію роботи.

У першому розділі виконано огляд вітчизняних, зарубіжних літературних джерел та проаналізовано сучасні вакуумні методи формування функціональних покриттів, проведено порівняльну характеристику даних методів та наведено їх переваги та недоліки. Проведено аналіз основних параметрів (геометричних, фізико-механічних, технологічних та конструктивних), які впливають на процес формування тонких плівок на оптичних поверхнях. Надано увагу розгляду та аналізу сучасним методам поверхневого модифікування оптичних поверхонь з використанням концентрованих потоків енергії (іонно-променевого полірування, лазерного модифікування, електронно-променевого оброблення), а також встановлено їх переваги та недоліки. Проведено аналіз сучасних методів для діагностування електронних потоків (визначення форми та розподілу густини потужності потоку). Сформульовано мету і задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі наведено методики з модифікування поверхонь оптичних елементів з використанням комбінованого електронно-променевого, оброблення, визначення та контролю стрічкового електронного потоку, оцінки якості поверхні оптичних виробів методом атомно-силової мікроскопії. Розглянуто удосконалене технологічне вакуумне обладнання для комбінованого електронно-променевого оброблення (поєднання в одному технологічному циклі електронно-променевого оброблення та резистивного осадження тонких плівок) оптичних елементів, яке створена на базі промислової універсальної вакуумної установки і включає спеціальне технологічне оснащення, як вдосконалене (електронну гармату Пірса, що формує електронний потік стрічкової форми, механізм переміщення оптичних пластин, кварцові нагрівачі для попереднього нагріву і завершального охолодження, високовольтне джерело живлення), так і унікальне – розроблене автором (систему зондування електронного потоку та автоматизовану систему гнучкого керування режимами електронно-променевого оброблення).

У третьому розділі розглядається низькоенергетична електронно-променева гармата Пірса, яка використовується для оброблення оптичних елементів. Представлено результати розрахунку електростатичного поля та траєкторії руху електронів з урахуванням об'ємного заряду та початкової швидкості. Проведено дослідження з визначення впливу потенціалу модулятора на форму електронного потоку. Для підвищення якісних характеристик оптичних елементів та підвищення повторюваності отримуваних результатів проводиться розв'язок задачі теплопровідності. Проводиться експериментальне дослідження з визначення вольт-амперних характеристик та з визначення форми, розмірів та розподілу густини струму низькоенергетичного стрічкового електронного потоку. В результаті проведеного зондування низькоенергетичного електронного потоку стрічкової форми було встановлено, що при різних параметрах електронно-променевої гармати Пірса на практиці спостерігаються різні закони розподілу густини струму, які є відмінними від



гаусівського розподілення, це пов'язано з відмінностями конструкції електронно-променевої гармати від ідеальної оптики Пірса. Зондування електронного потоку в процесі комбінованого електронно-променевого оброблення дасть можливість контролювати та управляти параметрами електронного потоку, що призведе до підвищення якісних характеристик оптичних елементів.

У четвертому розділі проводилися дослідження мікронерівностей поверхні оптичного скла до та після електронно-променевого оброблення. Побудовані залежності середньоарифметичної шорсткості поверхні в залежності від технологічних параметрів оброблення. Проведено дослідження поверхні оптичного скла з використанням інтерференційного методу. Визначено коефіцієнт пропускання оптичного скла після електронно-променевого оброблення. Визначено шорсткість тонких плівок алюмінію та срібла отриманих з використанням комбінованого електронно-променевого оброблення. Проведено дослідження стійкості до впливу морської води тонких покриттів алюмінію. Досліджено властивості тонких плівок золота осаджених на модифіковану електронно-променевим методом з двох сторін поверхню оптичного скла ТК14. Використання комбінованого електронно-променевого оброблення призводить до поліпшення поверхні тонких плівок (підвищення однорідності структури та зменшення мікродефектів, зниження середньої шорсткості поверхні, тонкі плівки, отримані за базовою технологією, мають більше зон з високими механічними напруженнями, порівняно з тонкими плівками, отриманими даним методом). Наведено інші можливості використання комбінованого електронно-променевого оброблення для створення функціональних елементів.

*Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає у наступному:*

1. Удосконалено математичну модель енергетичного впливу стрічкового електронного потоку на поверхню оптичного матеріалу з покриттям, що враховує отримані в реальному часі геометричні та енергетичні параметри електронного потоку і за допомогою, якої оперативно визначається розподіл

теплових полів в оптичному елементі.

2. Встановлено закономірності впливу робочих параметрів електронно-променевої гармати Пірса (напруга на модуляторі, прискорююча напруга, струм розжарення) на енергетичні параметри електронного потоку (коефіцієнт ефективності, розподіл щільності електронного потоку), що дозволило підвищити стабільність електронного потоку і як наслідок якісні характеристики оптичних елементів.

3. Запропоновано новий метод керованого комбінованого електронно-променевого оброблення оптичних елементів, який, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати контроль енергетичних параметрів електронного потоку в процесі проведення технологічного експерименту, що впливають на якісні характеристики оптичних елементів та дозволяє оперативно і в режимі реального часу проводити автоматичне корегування робочих режимів електронного потоку безпосередньо в процесі такого оброблення.

*Практичне значення отриманих результатів.* Результати дисертаційного дослідження становлять наукову основу для розробки, технічної реалізації та впровадження у виробництво технології комбінованого електронно-променевого оброблення оптичних елементів з метою покращення їх якісних характеристик. Результати експериментальних досліджень знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження) на підприємствах України та республіки Білорусь.

*Ключові слова:* тонкі плівки, якісні характеристики оптичних елементів, комбінована електронно-променева технологія, електронно-променева гармата.

## Summary

Kovalenko Y.I. Quality characteristics ty improvement of optical elements by combined electron-beam processing. – On the right of manuscript.

The thesis for obtaining a candidate of technical sciences degree, specialty – 05.03.07 – «Processes in physical and technical processing». - Cherkasy State Technological University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kyiv, 2021.

One of the priority areas for further development of scientific, technical and socio-economic status of the state is the development and improvement of optical devices and systems for various purposes. Optical devices have become especially important in the fields of communications and telecommunications, precision engineering and instrumentation, aerospace, in the production of quantum computing devices, in medicine, and so on.

With the gradual growth of requirements for thin coatings on optical materials (high adhesive strength of the coating on the surface, high corrosion resistance, optical homogeneity) there is a need to develop new and improved existing traditional technologies that would provide the necessary surface properties of optical elements.

The most common material for the manufacture of elements of these devices is optical glass. The main methods of modifying the surface of silicate glass in the optical industry are mechanical, chemical, heat treatment, as well as a combination of these methods. Among the existing thermal methods of surface treatment of optical glass is promising method of tape electron beam treatment, the main advantages of which are high accuracy and speed of processing, a wide range of operating modes, the ability of thermal and electronic effects only on the surface layer of glass. It is possible to create a surface with new physico-chemical and operational properties.

However, the question of achieving high quality characteristics of optical elements (surface condition, wear resistance and optical properties), especially when

operating in extreme conditions (deep vacuum, critical temperatures and pressures, high levels of humidity, contamination and radioactivity) today remain unresolved.

Another unresolved technical issue is the need for flexible control and regulation of energy parameters of electron beam processing directly during the technological cycle. This would allow to change the influence of the electron flow on the modified surface by changing the distribution of electric and thermal fields.

*The introduction reveals* the essence and state of the scientific problem, substantiates the relevance of the dissertation, provides data on scientific novelty, substantiates the reliability and practical value of the obtained scientific results, provides data on publications and testing of the work.

*The first section* reviews domestic and foreign literature sources and analyzes modern vacuum methods of forming functional coatings, comparative characteristics of these methods and their advantages and disadvantages. The analysis of the main quality parameters (geometric, physico-mechanical, technological and structural), which affect the process of formation of thin films on optical surfaces, is carried out. Attention is paid to the consideration and analysis of modern methods of surface modification of optical surfaces using concentrated energy fluxes (ion beam polishing, laser modification, electron beam treatment), as well as their advantages and disadvantages. The analysis of modern methods for diagnosing electronic fluxes (determination of the shape and distribution of flux power density) is carried out. The purpose and tasks of the dissertation are formulated.

*The second section* presents techniques for modifying the surfaces of optical elements using a combined electron beam, processing, detection and control of electron beam tape, quality assessment of the surface of optical products by atomic force microscopy. Advanced technological vacuum equipment for combined electron beam processing (combination in one technological cycle of electron beam processing and resistive deposition of thin films) of optical elements is considered, which is created on the basis of industrial universal vacuum installation and includes special technological equipment as an advanced electron beam. Which forms the electronic flow of the tape form, the mechanism of movement of optical plates, quartz

heaters for preheating and final cooling, high-voltage power supply), and unique - developed by the author (electronic flow sensing system and automated control system for electron beam processing).

*The third section* discusses Pierce low-energy electron beam gun, which is used to process optics elements. The results of the calculation of the electrostatic field and the trajectory of the electrons are presented, taking into account the bulk charge and the initial velocity. A study was conducted to determine the effect of the modulator potential on the shape of the electron flow. To improve the quality characteristics of optical elements and increase the repeatability of the obtained results, the solution of the thermal conductivity problem is performed. An experimental study is being conducted to determine the current-voltage characteristics and to determine the shape, size and current density distribution of low-energy tape electron flow. As a result of probing the low-energy electron flux of the tape shape, it was found that with different parameters of the Pierce electron beam gun in practice there are different laws of current density distribution that are different from the Gaussian distribution, this is due to differences in the design of the electron beam gun from the ideal Pierce optics. Probing of the electron flow in the process of combined electron beam processing will allow to control and manage the parameters of the electron flow, which will increase the quality characteristics of optical elements.

*In the fourth section*, studies of microroughnesses of the optical glass surface before and after electron beam treatment were performed. The dependences of the arithmetic mean surface roughness depending on the technological parameters of processing are constructed. The surface of optical glass was studied using the interference method. The transmittance of optical glass after electron beam processing is determined. The roughness of thin films of aluminum and silver obtained using combined electron-beam processing was determined. A study of the resistance to sea water of thin aluminum coatings. The properties of thin films of gold deposited on the electron-beam-modified surface of TK14 optical glass on two sides have been studied. The use of combined electron beam treatment leads to improved surface of thin films (increased homogeneity of structure and reduction of

microdefects, reduction of average surface roughness, thin films obtained by the basic technology have more zones with high mechanical stresses compared to thin films obtained by this method) . Other possibilities of using combined electron-beam processing to create functional elements are given.

The scientific novelty of the dissertation research is as follows:

1. Improved mathematical model of the energy effect of the tape electron flow on the surface of the coated optical material, which takes into account the obtained in real time geometric and energy parameters of the electron flow and by which the distribution of thermal fields in the optical element.

2. Regularities of influence of working parameters of electron-beam Pierce gun (voltage on the modulator, accelerating voltage, glow current) on energy parameters of an electronic stream (efficiency factor, distribution of density of an electronic stream) that allowed to increase stability of an electronic stream and as a result of qualitative characteristics are established. elements.

3. A new method of controlled combined electron-beam processing of optical elements is proposed, which, in contrast to the known ones, allows to control the energy parameters of the electron flow during the technological experiment, which affect the qualitative characteristics of optical elements and allows to carry out operatively and in real time automatic adjustment of operating modes of the electronic flow directly in the process of such processing. The practical significance of the results. The results of the dissertation research are the scientific basis for the development, technical implementation and introduction into production of the technology of combined electron-beam processing of optical elements in order to improve their quality characteristics. The results of experimental research have found practical use and implementation (confirmed by acts of implementation) at the enterprises of Ukraine and the Republic of Belarus.

Keywords: thin films, qualitative characteristics of optical elements, combined electron-beam technology, electron-beam gun.

## Список публікацій здобувача

### Монографії:

1. Покриття у приладобудуванні [Текст]: монографія / В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик, Ю.Ю. Бондаренко, Ю.І. Коваленко [та ін.] // К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 360 с. URL: <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/36387/1/Pokryttya-u-pryladobud.pdf> (Автором проведено аналіз сучасних фізичних методів та засобів отримання покриттів, описано принципи отримання тонких покриттів, розглянуто основне технологічне обладнання для отримання покриттів).

### Статті у фахових виданнях:

2. Vashchenko V.A. Effect of electron-beam treatment of sensor glass substrates for SPR devices on their metrological characteristics / V.A. Vashchenko, I.V. Yazenko, Yu.I Kovalenko, V.P. Kladko, O.Yo.Gudenko, P.M. Lytvyn, A.A. Korchovyi, S.V. Mamykin, O.S. Kondratenko, V.P. Maslov, H.V. Dorozinska, G.V. Dorozinsky. / International scientific journal Semiconductor physics quantum electronics & Optoelectronics – Volume 22, № 4. 2019. – P.444-451. URL: <https://doi.org/10.15407/spqeo22.04.44> (Здобувач виконав експериментальну роботу та аналіз впливу параметрів електронно-променевого оброблення на якісні характеристики покриттів на оптичному склі) (Іноземне видання. Видання включене до міжнародної науково-метричної бази SCOPUS та індексується директорією відкритого доступу (DOAJ)).

3. Antonyuk V.S. Formation of Wear-Resistant Coatings on Silicon Probes for Atomic Force Microscopy by Thermal Vacuum Evaporation / Antonyuk V.S., Bilokin S.O. Bondarenko M.M., Bondarenko Yu.Yu., Kovalenko Yu.I. // Journal of superhard materials. – 2015. – Vol.37. – No. 2. – pp.112-119. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1063457615020057> Автором запропоновано режими і здійснено осадження тонких плівок у вакуумі резистивним методом (Іноземне видання. Видання включене до міжнародної науково-метричної бази SCOPUS та індексується директорією відкритого доступу (DOAJ)).

4. Rud M.P., Boyko V.P., Kovalenko Yu.I., Bondarenko M.A., Kanashevich G.V., Vaschenko V.A. The express-diagnostics of band electronic stream / Вісник Черкаського державного технологічного університету, №3, 2005. – С.49-51. *(Автором проведено технологічний експеримент з зондування електронного потоку стрічкової форми).*

5. Коваленко Ю.І. Дослідження впливу морської води на мікрогеометрію поверхні металевих покриттів на оптичному склі К8 / Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, І.А. Рева, В.А. Ващенко [та ін.] / Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – Маріуполь: ПДТУ, 2010. – Вип. 20. – С. 222-225. URL: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/179> *(Автором проведено обробку результатів дослідження впливу морської води на поверхню металевих покриттів на оптичному склі)* (Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Google Scholar, Russian Science Citation Index, Ukrainian abstract journal “Dzherelo”, Referativnyi Zhurnal (VINITI)).

6. Коваленко Ю.І. Модифікація нанорельєфу на оптичному склі електронно-променевою мікрообробкою / Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, І.В. Яценко, М.П. Рудь [та ін.] / Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Черкаси: ЧДТУ, 2012. – №1 – С. 104-107. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/162871263.pdf> *(Автором проведено електронно-променеву мікрообробку поверхні оптичного скла).*

7. Рудь М.П., Дослідження та формування стрічкового електронного потоку для мікрообробки поверхонь матеріалів / М.П. Рудь, М.О. Бондаренко, Ю.І. Коваленко, І.В. Яценко [та ін.] / Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – №2 – С. 58-63. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/doslidzhennya-ta-formuvannya-strichkovogo-elektronnogo-potoku-dlya-mikroobrobki-poverhon-materialiv/viewer> *(Автором проведено технологічний експеримент з дослідження стабільності стрічкового електронного потоку при мікрообробленні оптичних матеріалів).* (Видання включене у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's



Periodicals Directory (New Jersey, USA)), Ukrainian abstract journal “Dzherelo”, Referativnyi Zhurnal (VINITI)).

8. Коваленко Ю.І. Вплив режимів ультразвукового очищення п'єзоелектричних елементів на якість сформованих на їхніх поверхнях срібних електродів / Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: машинобудування: зб. наук. праць. – Київ: НТУУ «КПІ», 2012. – №64. – С. 87-90. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/3035/1/87-64.pdf> (Автором проведено обробку результатів дослідження впливу ультразвукового очищення на поверхню срібного покриття на діелектрику). (Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Google Scholar, Russian Science Citation Index, Ukrainian abstract journal “Dzherelo”, Referativnyi Zhurnal (VINITI)).

9. Антонюк В.С. Підвищення мікротвердості та зносостійкості поверхонь елементів виробів з оптичного скла мікрообробкою електронним потоком у вакуумі / В.С. Антонюк, Ю.І. Коваленко, Ю.Ю. Бондаренко, М.О. Бондаренко / Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія Технічні науки. Вип. 31 (72) – 2015. – С. 3-9. (Автором проведено електронно-променеву мікрообробку поверхні оптичного скла) (Видання включене до міжнародної науково-метричної бази даних Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar).

10. Bondarenko M. Research of volt-ampere characteristics of the wire pierce electron gun at electron-beam microprocessing of dielectrics / Bondarenko M., Antonyuk V., Kovalenko Yu., Rud M., Haidash R // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. – 2018. – Vol.4. – No. 1. – pp.58-64. URL: [http://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/jul/13701/maksym\\_bondarenko.pdf](http://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/jul/13701/maksym_bondarenko.pdf) (Автором експериментально отримані дані для побудови вольт-амперних характеристик) (Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Google Scholar, Index Copernicus, Open Academic Journals Index (CGIJ), Research Bib (Academic Resource Index)).

11. Коваленко Ю.І. Дослідження вольт-амперних характеристик дрютяної електронної гармати Пірса для електронно-променевої мікрообробки діелектриків / Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, В.С. Антонюк/ Технічна інженерія, наукове видання Державного університету "Житомирська політехніка". № 1 (85), 2020. – С. 53-59. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2020-1\(85\)-53-59](https://doi.org/10.26642/ten-2020-1(85)-53-59) (*Автором проведено технологічний експеримент з визначення вольт-амперних характеристик електронної гармати Пірса*). (Видання включене до міжнародної науково-метричної бази даних Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar).

#### **Статті у інших виданнях:**

12. Рудь М.П. Моделювання низькоенергетичної стрічкової електронної гармати Пірса методом кінцевих елементів / М.П. Рудь, Г.В. Канашевич, М.О. Бондаренко, Ю.І. Коваленко / Наукові праці: науково-методичний журнал. – Вип.179. Т.191. Комп'ютерні технології. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2012 – С. 28 – 31. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npchduct\\_2012\\_191\\_179](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npchduct_2012_191_179) (*Автором проведено обробку результатів моделювання електронної гармати Пірса*). (Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Google Scholar, Russian Science Citation Index, Ukrainian abstract journal "Dzherelo", Referativnyi Zhurnal (VINITI)).

13. Коваленко Ю.І. Тест на змочування поверхні скла після електронно-променевої мікрообробки / Ю.І. Коваленко, П.В. Петльований, М.П. Рудь, Г.В. Канашевич // Вісник українського матеріалознавчого товариства - Київ, 2012. - № 5. - С. 57-62. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/125373> (*Автором проведено постановку та проведення експерименту з визначення коефіцієнту змочування поверхні скла після електронно-променевого мікрооброблення*). (Видання включене до міжнародної науково-метричної бази даних Google Scholar).

14. Гайдаш Р.П. Формування та керування стрічковим електронним потоком при мікрообробленні елементів пристроїв для адитивного виробництва / Р.П.Гайдаш, Ю.І.Коваленко, М.П.Рудь, М.О.Бондаренко, В.С.Антонюк //

Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – Вип. 13. – С. 69-78. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Stvm\\_2018\\_13\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Stvm_2018_13_10) (*Автором проведені теоретичні та експериментальні дослідження керованості стрічкового електронного потоку при мікрообробленні діелектричних матеріалів*). (Видання включене у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)).

15. Barabash V. Investigation of the influence of basic technical parameters of ribbon electron flow on the microrelief of the optical glass surface /V. Barabash , I. Zhaivoronok, Y. Kovalenko, V. Antonyuk/ International scientific journal "Machines. Technologies. Materials" Issue 3/2020 , с.106-109. (*Автором проведено технологічний експеримент з зондування електронного потоку стрічкової форми та електронно-променевого оброблення оптичного скла*). (Іноземне видання)

#### **Патенти на корисну модель:**

16. Патент №2004021257 Україна, МПК<sup>6</sup> C03B29/00; H01J37/305. Пристрій для електронно-променевого полірування виробів / Канашевич Г.В., Коваленко Ю.І., Бондаренко М.О., Ващенко В.А., Бойко В.П., Рудь М.П., Яценко І.В.; Заявл. 20.02.2004; опублік. 17.01.2005; Бюл. №1. – 3 с. (*Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова*).

17. Патент № u201507234 Україна, МПК<sup>6</sup> C03B 29/00 C03B 33/00. Спосіб обробки скла / Канашевич Г.В., Голуб М.В., Коваленко Ю.І.; Заявл. 20.07.2015; опублік. 11.04.2016; Бюл. №7. – 4 с. (*Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова*).

#### **Тези доповідей у збірках матеріалів конференцій:**

18. Бондаренко М.А. Исследование микрогеометрии поверхности оптических стекол после электронной и после лазерной обработки методом атомно-силовой микроскопии / М.А.Бондаренко, Ю.Б.Шевченко, В.П.Бойко, Ю.И.Коваленко [и др.] // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: VII Междунар. сем., 1–3 ноября 2006 г: тезисы докл. – Минск, 2006. – С. 139-142. (*Автором проведено порівняльний аналіз електронного та лазерного методів оброблення поверхонь елементів з оптичного скла*).

19. Рудь М.П. Впровадження комп'ютеризованої системи керування в процес електронної обробки оптичних матеріалів / М.П.Рудь, Г.В.Канашевич, В.П.Бойко, Ю.І.Коваленко [и др.] // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: VII ежегод. междунар. Пром. конф., 12-16 лютого 2007 р.: тези доп. – сел.Славське-м.Київ, 2007. – С. 460. *(Автором сконструйовано автоматизовану систему керування).*

20. Рудь М.П. Дослідження просторово-енергетичних характеристик електронного потоку стрічкової форми / М.П. Рудь, В.А. Ващенко, Ю.І. Коваленко, В.П. Бойко, І.В. Яценко // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: X междунар. Пром. конф., 18-22 лютого 2010 р: тези доп. – сел. Славське-м. Київ, 2010. – С. 162-164. *(Автором експериментально отримані просторово-енергетичні характеристики електронного потоку стрічкової форми).*

21. Рудь М.П. Применение метода атомно-силовой микроскопии, как составляющей комплексной методики измерения параметров качества оптических изделий, обработанных низкоэнергетическим электронным потоком / М.П. Рудь, В.П. Бойко, Г.В. Канашевич, Ю.И. Коваленко, И.А. Рева, В.А. Ващенко // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: IX Междунар. конф., 12-15 октября 2010 г: тезисы докл. – Минск, 2010. – С. 220-223. *(Автором систематизовані показники якості виробів після електронного оброблення).*

22. Коваленко Ю.И. Изучение упорядоченных структур, сформированных на металлизированных поверхностях диэлектриков комбинированной электронной технологией / Ю.И. Коваленко, М.П. Рудь, И.В. Яценко, А.В. Котляр, В.П. Бойко // Электронная микроскопия РКЭМ-2012: XXIV Рос. конф., 29 мая-1 июня 2012: тезисы докл. – г.Черноголовка, 2012. – С. 97. *(Автором проведено комплексне дослідження впорядкованих структур на діелектриках).*

23. Бондаренко М.О. Оцінка адгезійної міцності на стирання оксидних покриттів на оптичному склі методом атомно-силової мікроскопії / М.О.Бондаренко, Ю.І.Коваленко, І.А.Рева, І.В. Яценко [та ін.] //

Приладобудування: стан і перспективи: XII міжнар. наук.-техн. конф., 23-24 квітня 2013 р: тези доп. – м. Київ, 2013. – С. 207. *(Автором підготовлено методичні рекомендації для оцінки адгезійної міцності оксидних покриттів на оптичному склі).*

24. Kovalenko Y.I. Study of ordered oxide patterns got on the dielectric surfaces with the combined electronic technology / Y.I.Kovalenko, M.A.Bondarenko, E.V.Vertsanova, I.V.Iatsenko [etc.] // Physics and technology of thin films and nanosystems: XIV Intern. conf.: thesis, May, 20-25, 2013. - Ivano-Frankivsk, 2013. – pp. 92. *(Автором запропоновано режими і здійснено комбіноване електронно-променеве оброблення оксидних покриттів осаджених на діелектричних поверхнях).*

25. Антонюк В.С. Модифицирование металлизированных поверхностей ленточным электронным потоком / В.С. Антонюк, Ю.И. Коваленко, М.А. Бондаренко, И.В. Яценко // Инженерия поверхности и реновация изделий: XIII Междунар. науч.-техн. конф., 3-7 июня 2013 г: тезисы докл. – г.Ялта-г.Київ, 2013. – С. 15-19. *(Автором проведено експериментальне модифікування металізованих поверхонь стрічковим електронним потоком).*

26. Бондаренко М.А. Изучение механизма формирования ультратонких функциональных покрытий на оптическом стекле при комбинированной электронно-лучевой микрообработке / М.А. Бондаренко, Ю.И. Коваленко, Ю.Ю. Бондаренко, С.А. Билоконь [и др.] // Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов: III междунар. науч. конф., 15-16 мая 2014: матер.докл.– Алматы: Казак университеті, 2014. – С. 64-65. *(Автором експериментально підтверджено механізм формування ультратонких функціональних покриттів на оптичному склі електронним потоком).*

27. Антонюк В.С. Повышение износостойкости деталей оптического приборостроения / В.С. Антонюк, Ю.И. Коваленко, М.О Бондаренко //”Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте”: Материалы 14-го Международного научно-технического

семинара, 24 - 28 февраля 2014 г. Свалява – Киев: АТМ України.- 2014. – С. 13 – 17. *(Автором проведено експериментальне одержання зразків для дослідження).*

28. Гайдаш Р.П. Математичне моделювання в задачах оптимального керування процесом електронно-променевої мікрообробки діелектричних матеріалів / Р.П. Гайдаш, Ю.І. Коваленко, Ю.Ю. Бондаренко // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-технической конференции, 26-29 сентября 2018 г., г. Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2018. – С. 27-29. *(Автором проведено постановку та розв'язок математичної моделі оптимального керування електронно-променевим мікрообробленням діелектриків).*

29. Коваленко Ю.И. Исследование распределения энергии в зоне действия ленточного электронного потока / Ю.И. Коваленко, В.С. Антонюк, Л.Г. Полонский // Зб. тез доповідей І-ї Міжнародної науково-технічної конференції “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019”; 13–15 травня 2019 р., – Вінниця : ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. С. 295- 296.*(Автором проведено експериментальне отримання зон термічного впливу на термочутливому матеріалі)*

30. Коваленко Ю.І. Експериментальне дослідження адгезійної міцності зносостійких покриттів на оптичних виробах після їх електронно-променевого модифікування / Коваленко Ю.І., Антонюк В.С./ Зб. праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 06–09 листопада 2019 р., м. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка» 2019 – С. 123-125. *(Автором проведено експериментальне модифікування поверхні тонкої плівки стрічковим електронним потоком).*

## ЗМІСТ

	стор.
СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	22
ВСТУП .....	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ .....	30
1.1. Аналіз основних факторів, які впливають на процес формування та якість отриманих тонких плівок на оптичних поверхнях .....	31
1.2. Сучасні методи модифікування поверхонь оптичних елементів .....	36
1.2.1. Вакуумні методи формування функціональних покриттів .....	36
1.2.2. Методи оброблення оптичних поверхонь концентрованими потоками енергії .....	39
1.3. Особливості застосування методу електронно-променевого модифікування поверхонь оптичних елементів .....	44
1.4. Методи і засоби формування, керування та діагностування параметрів електронного потоку .....	50
1.5. Висновки до розділу .....	56
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНА БАЗА ТА ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	59
2.1. Основні характеристики об'єктів дослідження .....	59
2.2. Комплекс методик для проведення експериментальних досліджень .....	60
2.2.1. Методика модифікування поверхонь оптичних матеріалів комбінованим електронно-променевим впливом .....	60
2.2.2. Оцінки якості поверхні оптичних деталей методом атомно- силової мікроскопії .....	65
2.3. Технічне забезпечення експериментальних досліджень .....	70
2.3.1. Умови проведення технологічного експерименту .....	70
2.3.2. Критерії, що висуваються до технічного забезпечення експериментальних досліджень .....	70

2.3.3. Удосконалення базового вакуумного обладнання для проведення технологічного експерименту .....	72
2.3.4. Контрольно-вимірювальне обладнання технологічного процесу .....	77
2.4. Визначення форми, розмірів та розподілу густини струму зондуванням стрічкового електронного потоку .....	80
2.5. Висновки до розділу .....	82
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРИ КОМБІНОВАНОМУ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОМУ ОБРОБЛЕННІ .....	
3.1. Моделювання низькоенергетичної електронно-променевої гармати Пірса .....	83
3.2. Моделювання процесу розповсюдження температури в оптичному елементі .....	93
3.3. Експериментальні дослідження характеристик ЕПГ Пірса .....	103
3.4. Висновки до розділу .....	110
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	
4.1. Експериментальні дослідження якісних характеристик поверхні з оптичного скла після електронно-променевого оброблення .....	111
4.1.1. Визначення мікронерівностей поверхні оптичного скла обробленого електронним потоком .....	111
4.1.2. Дослідження поверхні оптичного скла інтерференційним методом .....	114
4.1.3. Визначення коефіцієнта пропускання оптичного скла після комбінованого електронно-променевого оброблення .....	116
4.2. Дослідження впливу морської води на поверхню металевих покриттів на оптичному склі К8 .....	117
4.3. Визначення мікрошорсткості поверхні тонких покриттів отриманих комбінованим електронно-променевим обробленням .....	120
4.4. Визначення міцності тонких плівок отриманих комбінованим електронно-променевим обробленням .....	122



4.5. Комплексні дослідження тонких покриттів золота отриманих на поверхні оптичного скла марки ТК14 .....	123
4.6. Використання комбінованого електронно-променевого оброблення для виготовлення інших функціональних елементів .....	127
4.6.1 Покращення механічних характеристик наноінструментарію для скануючої зондової мікроскопії .....	127
4.6.2 Підвищення функціональної ефективності виробів із п'єзоелектричних керамік .....	130
4.7. Використання результатів дисертаційного дослідження в промисловості та в навчальному процесі закладів вищої освіти України .....	131
4.8. Висновки до розділу .....	132
ВИСНОВКИ .....	134
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	136
ДОДАТКИ .....	157
ДОДАТОК А. Порівняльні таблиці .....	158
ДОДАТОК Б. Основні технічні характеристики експериментальної установки для здійснення комбінованого електронно-променевого оброблення .....	162
ДОДАТОК В. Результати дослідження форми поверхні оптичного скла марки К8 після КЕПО за різних режимів .....	163
ДОДАТОК Г. Документація про наукову значимість, практичне використання та впровадження основних результатів роботи .....	167
ДОДАТОК Д. Список публікацій здобувача за темою дисертації .....	176

## СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСМ – атомно-силова мікроскопія;

ЕПГ – електронно-променева гармата;

ЕГ-електронна гармата;

ЕПО – електронно-променеве оброблення;

ОЕ – оптичний елемент;

ЗТВ – зона термічного впливу;

КПЕ – концентровані потоки енергії;

КЕПО – комбіноване електронно-променеве оброблення;

КЕПВ – комбінований електронно-променевий вплив;

СТВ - стадії термічного впливу;

$\alpha$  – коефіцієнт температуропровідності оптичного матеріалу,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$C$  – коефіцієнт теплоємності оптичного матеріалу,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$ ;

$H$  – відстань від аноду електронної гармати до оброблюваної поверхні;

$I_{роз}$  – струм розігріву катоду, А;

$I_{пот}$  – струм електронного потоку, мА;

$L$  – робоча довжина катоду, мм;

$P_{пот}$  – питома потужність електронного потоку,  $\text{Вт}/\text{см}^2$ ;

$p_0$  – робочий тиск у вакуумній камері, Па;

$Ra$  – середньоарифметичні мікронерівності поверхні оптичного виробу, нм;

$T_0$  – початкова температура оптичного матеріалу, К;

$U_{прис}$  – прискорююча напруга, кВ;

$U_{мод}$  – напруга на модуляторі, В.

## ВСТУП

Одним із пріоритетних напрямків подальшого розвитку науково-технічного та соціально-економічного стану держави є розроблення та удосконалення оптичних приладів та систем різноманітного призначення. Особливе значення оптичні пристрої набули в галузях зв'язку та телекомунікацій, точного машино- та приладобудування, аерокосмічній галузі, при виробництві квантових обчислювальних пристроїв, у медицині тощо.

З поступовим зростанням вимог до тонких покриттів на оптичних матеріалах (висока адгезійна міцність покриття, висока корозійна стійкість, оптична однорідність) виникає необхідність у розробці нових та вдосконалені уже існуючих традиційних технологій, які б забезпечували необхідні властивості поверхні оптичних елементів.

Найпоширенішим матеріалом для виготовлення елементів цих пристроїв залишається оптичне скло, основними перевагами якого є дотримання стабільно високих оптичних характеристик в оптичному спектрі частот, хімічна та біологічна інертність, стійкість до екстремальних умов зовнішнього середовища, гарна механічна та термічна оброблюваність тощо.

В той же час, основними методами модифікування поверхні силікатного скла в оптичній промисловості залишаються механічне, хімічне, теплове оброблення, а також комбінація цих методів. Серед існуючих теплових методів поверхневого оброблення оптичного скла перспективним є метод стрічкового електронно-променевого оброблення, основними перевагами якого є висока точність та швидкість оброблення, широкий діапазон робочих режимів, здатність термічного та електронного впливу лише на поверхневий шар скла. При цьому можливе створення поверхні з новими фізико-хімічними та експлуатаційними властивостями. Сучасний рівень технічних досягнень в області поверхневого електронно-променевого оброблення оптичних матеріалів, тісно пов'язаний з роботами Ващенко В.А., Дудка Г.В., Лісоченка В.Д., Канашевича Г.В. та ін.

Разом з тим, питання досягнення високих характеристик якості оптичних елементів (стан поверхні, їх зносостійкість та оптичні властивості), особливо при їх експлуатації в екстремальних умовах (глибокого вакууму, критичних температур та тисків, підвищених рівнів вологості, забрудненості та радіоактивності) на сьогоднішній час залишаються не вирішеними.

Іншим не розкритим технічним питанням залишається необхідність гнучкого контролю та регулювання енергетичними параметрами електронно-променевого оброблення безпосередньо під час проведення технологічного циклу. Це дозволило б за зміною розподілу електричних та теплових полів корегувати вплив електронного потоку на модифіковану поверхню.

Таким чином, підвищення якісних характеристик оптичних елементів шляхом розробки нового та удосконалення існуючого методичного, математичного, програмного забезпечення, модернізації базового технологічного обладнання (поєднання резистивного методу осадження тонких покриттів і електронно-променевого оброблення в одному технологічному циклі), що в цілому представляє собою комбіновану технологію електронно-променевого оброблення є важливою і актуальною задачею.

*Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.* Дисертаційна робота виконувалася в Черкаському державному технологічному університеті на кафедрі фундаментальних дисциплін та прикладного матеріалознавства та пов'язана з тематикою науково-дослідних робіт: “ Технологічні основи отримання металізованих покриттів на виробках мікрооптики і наноелектроніки електронно-променевим методом” (номер державної реєстрації 0103U003689), “ Діагностика функціональних шарів у виробках мікрооптики і наноелектроніки, отриманих електронними технологіями” (номер державної реєстрації 0106U004500), “Технологічні основи електронної нанообробки поверхонь виробів із п'єзоелектричних керамік” (номер державної реєстрації 0109U002738), “Отримання та дослідження зносостійких покриттів на поверхнях оптичних виробів спеціального призначення комбінованим методом термічного випаровування ” (номер державної реєстрації 0110U000852),

“Технологічні основи отримання впорядкованих наноструктур на поверхнях зондів для атомно-силової мікроскопії” (номер державної реєстрації 0111U002932), “Технологічні основи створення теплоізоляційних нанорозмірних оксидних покриттів на поверхнях оптичних діелектриків комбінованим термовакuumним осадженням” (номер державної реєстрації 0112U001701).

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи полягає в підвищенні якісних характеристик оптичних елементів (зменшенні кількості макро- та мікродефектів поверхні, залишкової шорсткості поверхні, підвищенні їх механічної міцності) внаслідок поєднання технології отримання тонких покриттів на їх поверхнях та гнучкого керування процесом електронно-променевого оброблення в одному технологічному циклі.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі основні задачі:

1. На основі аналізу літературних джерел визначити фактори, які впливають на стан поверхні та якісні характеристики оптичних елементів і обґрунтувати наукові задачі підвищення якості оптичних елементів комбінованим електронно-променевим обробленням.

2. Запропонувати комплекс методик по проведенню керованого комбінованого електронно-променевого оброблення, дослідженню якості підготовки та модифікування оптичних елементів, отриманих із застосуванням такого оброблення.

3. Розробити математичну модель теплового впливу електронного потоку на поверхню оптичного елементу.

4. Встановити закономірності впливу робочих параметрів електронно-променевої гармати Пірса (напруги на модуляторі, прискорюючої напруги, струму розжарення) на енергетичні параметри електронного потоку

5. Здійснити модернізацію базового технологічного обладнання для проведення на його основі комбінованого електронно-променевого оброблення в одному циклі, визначити раціональні режими такого оброблення.

6. Провести експериментальні дослідження з визначення якісних характеристик оптичних елементів отриманих комбінованим електронно-променевим обробленням.

*Об'єкт дослідження* – явища та процеси, що виникають при комбінованому електронно-променевому обробленні поверхневих шарів оптичних матеріалів.

*Предмет дослідження* – метод, моделі та засоби комбінованого електронно-променевого оброблення поверхонь оптичних елементів.

**Методи дослідження.** Для вирішення завдань дисертаційної роботи застосовувалися сучасні методи теоретичних досліджень, в основі яких лежать положення теорій: теплопровідності, термічної емісії електронів, взаємодії заряджених частинок з речовиною.

Експериментальні дослідження впливу електронно-променевого оброблення на якісні характеристики поверхонь оптичних елементів проводилися з використанням оптичної інтерферометрії, скануючої атомно-силової мікроскопії (АСМ), а також методів математичної статистики для оброблення експериментальних даних.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Удосконалено математичну модель енергетичного впливу стрічкового електронного потоку на поверхню оптичного матеріалу з покриттям, що враховує отримані в реальному часі геометричні та енергетичні параметри електронного потоку і за допомогою, якої оперативно визначається розподіл теплових полів в оптичному елементі.

2. Встановлено закономірності впливу робочих параметрів електронно-променевої гармати Пірса (напруга на модуляторі, прискорююча напруга, струм розжарення) на енергетичні параметри електронного потоку (коефіцієнт ефективності, розподіл щільності електронного потоку), що дозволило підвищити стабільність електронного потоку і як наслідок якісні характеристики оптичних елементів.

3. Запропоновано новий метод керованого комбінованого електронно-

променевого оброблення оптичних елементів, який, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати контроль енергетичних параметрів електронного потоку в процесі проведення технологічного експерименту, що впливають на якісні характеристики оптичних елементів та дозволяє оперативно і в режимі реального часу проводити автоматичне корегування робочих режимів електронного потоку безпосередньо в процесі такого оброблення.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати дисертаційного дослідження вирішують важливе науково-прикладне питання підвищення якісних характеристик оптичних елементів шляхом розроблення та упровадження нового методичного, математичного, технічного та програмного забезпечення, що в цілому представляє собою комбіновану технологію електронно-променевого оброблення. Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

1. Створено та програмно реалізовано математичну модель, що дозволяє з високою точністю і в режимі реального часу визначати розподіл теплових полів по поверхні оптичного елементу.

2. Вдосконалено вакуумне обладнання в частині автоматизації технологічного комбінованого електронно-променевого оброблення, що дозволяє здійснювати високопродуктивне та якісне оброблення оптичних елементів в одному технологічному циклі.

3. Розроблено автоматизовану систему керування комбінованим електронно-променевим обробленням, яка дозволяє безпосередньо в режимі робочого циклу гнучко регулювати енергетичні параметри стрічкового електронного потоку, що призводить до підвищення точності та повторюваності результатів технологічного експерименту.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, математичні моделі знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження) на підприємствах України (ПМПП «Фотоніка Плюс», ПрАТ «Укрп'єзо», ТОВ НВФ "ОНТФ" , (м. Черкаси), а також за кордоном (ТДВ "Микротестмашины" (м. Гомель, Білорусь)).

Основні положення дисертації використані в навчальних курсах Черкаського державного технологічного університету з дисциплін «Теоретичні основи теплотехніки», «Основи математичного моделювання систем», «Основи теплотехніки».

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є науковою працею автора, який самостійно застосовував комплекс методичних підходів, здійснював математичне моделювання та експериментальні дослідження і аналіз одержаних даних, сформулював висновки і рекомендації за результатами роботи. Так, автором проаналізовано основні негативні фактори, що впливають на якісні характеристики елементів оптичних пристроїв та систем, а також вимоги, які висуваються до цих елементів. Вдосконалено експериментальні методики та модернізовано окремі вузли обладнання для комбінованого електронно-променевого оброблення(КЕПО) оптичних елементів. Проведене чисельне моделювання теплового впливу електронного потоку стрічкової форми на оптичну поверхню. Надано рекомендації щодо дотримання раціональних режимів КЕПО, а також проведено впровадження результатів розробок та досліджень на вітчизняних та закордонних підприємствах України і в навчальний процес.

**Апробація результатів дисертації.** Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати досліджень доповідалися на міжнародних наукових конференціях: „Электронная микроскопия” (м. Чорноголовка 2012р.р.), "Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии" (м. Мінськ, 2006, 2010 р.р.), "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях" (сел. Славське, Львівської обл., 2007, 2010 р.р.), "Приладобудування: стан і перспективи" (м. Київ, 2013 р.), "Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте" (м. Свалява – м. Київ, 2014 р.), "Инженерия поверхности и реновация изделий" (м. Ялта – Київ, 2013 р.), " Physics and technology of thin films and nanosystems: XIV Intern. conf." (м. Івано-Франківськ, 2013 р.), "Современные проблемы физики конденсированного состояния,



нанотехнологий и наноматериалов" (м. Алмати, 2014 р.), "Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении" (м. Одеса, 2018 р.), "Перспективи розвитку машинобудування та транспорту"; (м. Вінниця, 2019 р.), "Процеси механічної обробки, верстати та інструмент"; (м. Житомир, 2019 р.).

**Публікації.** За темою дисертацій опубліковано 30 наукових праць, з них 1 монографія, 10 статей у фахових виданнях (2 в іноземних виданнях, що індексуються в Scopus), 2 патенти України на корисну модель, 4 статті у інших виданнях, 13 публікацій матеріали конференцій.

**Структура і об'єм дисертації.** Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 181 сторінку, і містить 68 рисунків, 3 таблиці, список використаних джерел складає 170 найменувань і займає 21 сторінку, а також 6 додатків на 24 сторінках.

# **РОЗДІЛ 1.**

## **АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ**

### **МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

В розділі проведено аналіз основних параметрів (геометричних, фізико-механічних, технологічних та конструктивних), які впливають на процес формування тонких плівок на оптичних поверхнях [1-14]. Розглянуто та проаналізовано сучасні вакуумні методи формування функціональних покриттів, проведено порівняльну характеристику даних методів та наведено їх переваги та недоліки [14-59]. Надано увагу розгляду та аналізу сучасним методам поверхневого модифікування оптичних поверхонь (у тому числі зі сформованими на поверхні покриттями) з використанням концентрованих потоків енергії (іонно-променевого полірування, лазерного модифікування, електронно-променевого оброблення) [60-89], а також встановлено їх переваги та недоліки.

В результаті порівняльного аналізу встановлено, що найбільш перспективним методом, що буде використаний як базовий, у даній дисертації є резистивне напилення з подальшим електронно-променевим обробленням осаджених тонких плівок. Запропоноване комбіноване застосування цього методу, на думку автора, та за результатами наукових досліджень проведених в роботах [91-121], дозволить знизити шорсткість поверхні оптичних виробів, чим підвищить техніко-експлуатаційні характеристики приладів в тій галузі, де ці вироби знайшли застосування.

Також, проведено аналіз сучасних методів для діагностування електронних потоків (визначення форми та розподілу густини потужності потоку) [122-138].

### 1.1. Аналіз основних факторів, які впливають на процес формування та якість отриманих тонких плівок на оптичних поверхнях

Для виготовлення оптичних елементів, інтегральних мікросхем, сенсорів та іншого, в більшості випадків використовують оптичне скло та склокерамічні матеріали, які мають унікальні властивості (оптичні, технологічні, експлуатаційні) [1] та велику різноманітність геометричних розмірів і форм (тонкі пластини, призми, лінзи, прямокутні елементи тощо).

Як правило, в більшості випадків при виготовленні оптичних елементів використовують оптичне скло сорту «крони» марок К8, К108, ТК15, БК10 та інші [1, 2]. Таке оптичне скло використовують в якості основи для нанесення на них різноманітних тонких плівок при виготовленні оптичних елементів та їх систем для різноманітних галузей науки і техніки, рисунок 1.1.



Покриття для  
тензодатчиків

Світлофільтри

Рисунок 1.1 – Загальний вигляд деяких прикладів оптичних елементів з тонкими покриттями

При виготовленні оптичних елементів необхідно обов'язково враховувати їх функціональне призначення та умови експлуатації.

При отриманні одно- та багат шарових тонких плівок на оптичному склі, в залежності від їх призначення та умов експлуатації, необхідно дотримуватися наступних вимог [3,4]: хімічної стійкості (здатності витримувати вплив кислот, лугів, розчинників тощо), вологостійкості (стійкості до впливу вологої атмосфери, прісної та морської води), механічної стійкості ( стійкості до

зовнішніх статичних та динамічних механічних впливів), термічної міцності (стійкості до заданих температур, термоударів та іншого), а також оптичних вимог, які характеризуються спектрофотометричними, колориметричними та іншими значеннями [2].

Серед основних параметрів, які мають суттєвий вплив на якість тонких покриттів можна виділити наступні [45]:

- геометричні: дистанція розпилювання (для різних способів вакуумного напилення обирається в межах від 20 до 500 мм) [5]; кут падіння матеріалу, що осаджується [6];
- кінематичні: швидкість випаровування (впливає на розмір елементів структури та пористість покриттів) [6];
- якісні: якість підготовки поверхні до оброблення (впливає на розмір елементів структури, розташування кристалів, на адгезію та чистоту плівки) [6]; чистота плівкоутворюючого матеріалу [6];
- технологічні: температура нагріву підкладинки (впливає на розмір елементів структури, розташування кристалів, напруження в покритті) [6.7]; температура на випарнику [7]; тиск залишкових газів у вакуумній камері [5.6.7]; товщина плівки (впливає на фізичні властивості плівки) [6];
- конструктивні: розміри і конструкція робочої камери (визначається геометрією напилюваних виробів, розпилювачів, тощо).

Конструктивні параметри найбільше впливають на ефективність процесу, а правильно підібрані технологічні параметри мають вирішальний вплив на зародкоутворення і зростання тонких плівок та на якість сформованих покриттів.

В результаті аналізу літературних джерел [8, 9] було встановлено, що склад та якість плівкоутворюючого матеріалу має вплив на якість покриття і на хід технологічного процесу. Відомо, що номенклатура речовин, які використовуються для виробництва тонких плівок, достатньо широка і постійно розширюється. В якості основних матеріалів з яких можуть бути отримані функціональні покриття у вакуумі термічним способом, найчастіше

використовуються чисті метали, їхні оксиди (при отриманні керамічних покриттів), з'єднання кремнію та напівпровідникові неорганічні матеріали (Додаток А, таблиця А.1) [8, 9].

При цьому, є наступні основні вимоги до плівкоутворюючих матеріалів [8, 9]:

1) Показник заломлення шару у заданому спектральному діапазоні повинен забезпечувати необхідну величину.

2) Значення густини тонких плівок мають бути наближені до максимального значення (для уповільнення процесів старіння оптичних покриттів та одержання максимального значення показників заломлення).

3) Отримані тонкі плівки повинні мати високу адгезію до підкладки, бути міцними (витримати протирання і очищення розчинниками), мати низькі механічні напруження.

4) Пошкодження шарів від дії лазерного випромінювання, радіації, частинок високих енергій, а також вплив змін температури на властивості шарів мають бути мінімальними.

5) Дотримання хімічної чистоти речовин, що використовуються.

6) Мінімальне газовиділення речовини, що наноситься при її нагріві у випарнику.

7) Прозорість (при створенні багатошарових оптичних покриттів з різноманітних матеріалів світлові втрати в покриттях повинні бути мінімальними).

8) Оптичну однорідність.

9) Стабільність поведінки в умовах експлуатації.

Отримання покриттів заданої товщини (як геометричної, так і оптичної) відбувається на поверхні підкладок, які виготовлені з різноманітних матеріалів. При цьому, якісний рівень оптико-електронного приладу в більшості випадків залежить від якості оптичних деталей, що входять до його складу. Тому, матеріал з якого виготовлені підкладки, повинен мати однорідний склад, бути хімічно інертними, володіти високою електричною та

механічною стійкістю. Підкладинки зазвичай підбирають таким чином, щоб їх властивості дозволяли отримувати покриття з необхідними характеристиками.

До підкладинок застосовують наступні вимоги [5, 10]:

- високий клас чистоти поверхні (виключає руйнування покриття через дефекти та нерівності поверхні);
- незначна вартість та доступність;
- достатня механічна міцність (виключає розтріскування виробу);
- площинність (забезпечує сумісність з маскою в процесі літографії, а також зменшення температурних градієнтів під час термооброблення);
- відсутність пор, тріщин, впадин, заглиблень (виключає розриви у виготовленій плівці, а також запобігає появі додаткових структурних дефектів в плівці);
- термостійкість (забезпечує можливість нагріву при обробленні);
- стійкість до термоударів (виключає розтріскування в процесі термооброблення);
- стійкість до хімічних реагентів (необхідна для літографії, витравлювання і хімічного оброблення покриттів);
- високий питомий опір (забезпечує електроізоляцію плівки та контактів до неї від корпусу вимірювального пристрою, а також при виготовленні плівкових пристроїв на підкладинці);
- високе значення діелектричної постійної для непровідної підкладинки (запобігає пробією плівки на корпус при подачі високої напруги);
- стійкість до витирання (для технічного оброблення підкладинки та скрайбування алмазним зондом);
- оптична гладкість підкладинки (створює умови для літографії при виготовленні однорідних плівок з певними характеристиками, при виготовленні гетероструктур, тощо).

Якісне очищення поверхні перед напиленням тонких плівок має визначальний вплив на якість отриманих оптичних елементів. Недостатньо якісне очищення поверхні перед обробленням призводить до погіршення

структури зростаючих шарів, флуктацій товщини шарів, до виникнення дефектів (утворення мікронеоднорідностей, виникнення проколів в плівці), зменшення адгезії, погіршення експлуатаційних характеристик покриття [11].

Особливе значення має поверхня підкладинки, яка має бути оптично гладкою з мінімальною шорсткістю, мінімальною хвилястістю та ідеальною площинністю [5], оскільки властивості плівок значною мірою залежать від висоти нерівностей підкладинок, яка не повинна перевищувати товщини плівок та знаходиться в межах від 0,01 до 1 мкм [5].

Тонкі покриття, які отримані на поверхнях зі значною шорсткістю, як правило, характеризуються флуктуацією товщини шарів покриття, що призводить до локальних змін електрофізичних властивостей плівок, втратами на розсіювання, різними розмірами зерен, випадковою орієнтацією кристалів і великими міжзерневими напруженнями [10, 11]. Шорсткість поверхні і нерівномірна товщина покриттів призводять до локальних змін електрофізичних властивостей, тим самим знижуючи їх надійність та обмежуючи їх використання. Чим більша шорсткість поверхні оптичних елементів з тонкими плівками, тим швидше відбувається процес її старіння, що відповідно призводить до зниження часу експлуатації виробу з покриттям [13]. Для усунення впливу вихідного мікрорельєфу на шорсткість тонких плівок поверхня основи в ідеалі має бути атомарно гладкою. Тому, для усунення цих обмежень необхідно зменшити шорсткість поверхні і внести при цьому мінімальні пошкодження в приповерхневий шар. Степінь шорсткості поверхні основи залежить від технології її отримання. Для отримання поверхонь з плоским рельєфом використовують, як традиційні методи (механічне шліфування, хіміко-механічне полірування), так і методи ґруновані на використанні концентрованих потоків енергії (КПЕ): іонно-променеве полірування, електронно-променеве, лазерне та плазмове оброблення. Традиційні методи оброблення забезпечують достатньо низьку шорсткість поверхні оптичних елементів, проте після використання цих технологій оброблення на поверхні оптичних елементів виникають дефектний (складає від

0,5 мкм до 1,5 мкм, із зовнішнім мікрорельєфом  $(10...15) \cdot 10^{-8}$  м [12, 13]), тріщинуватий шари з залишковими термонапруженнями [1], які призводять до погіршення техніко-експлуатаційних характеристик цих елементів і зниження якості отриманих вакуумних покриттів та оптичної системи в цілому. Також цим методам притаманна низька продуктивність [14].

Тому для фінішних операцій оброблення поверхні оптичних елементів, краще за все використовувати технології з використанням КПЕ, оскільки якість оброблення поверхні оптичного скла впливає на стабільність, точність, надійність та час експлуатації оптичних елементів.

## 1.2. Сучасні методи модифікування поверхонь оптичних елементів

Існує велика кількість методів осадження тонких плівок на поверхні оптичних матеріалів. В залежності від необхідної міцності, товщини і пористості покриттів, розмірів та геометрії заготовки використовують найбільш підходящий в кожному конкретному випадку метод [14].

### 1.2.1. Вакуумні методи формування функціональних покриттів

Серед існуючих методів отримання тонких покриттів найбільш технологічними є вакуумні методи [5, 9, 10, 17-23, 26-30, 37-38, 54]. Вакуумні методи наплення покриттів широко використовуються для отримання функціональних (зносостійких, термостійких, оптичних, корозійно-захисних тощо) покриттів на різноманітних діелектричних підкладках (ситалових, скляних, керамічних та інших), які застосовуються в мікроелектроніці, оптоелектроніці, інтегральній оптиці, оптичному приладобудуванні [14-16].

Вакуумні методи наплення набули широкого застосування завдяки універсальності технології, високій продуктивності наплення покриттів, можливості отримувати якісні тонкі покриття, невеликій енергоємності, екологічності, можливості контролю основних технологічних параметрів



(швидкості осадження, товщини плівки) в процесі нанесення покриттів, повторюваності результатів та іншими перевагами в порівнянні з традиційними методами осадження тонких покриттів на оптичних елементах різноманітного функціонального призначення (гальванічного осадження, плакування, плазмового напилення тощо) [10, 5].

Утворення якісних тонких покриттів у вакуумі є складним процесом, який включає наступні основні стадії [14]: адсорбція атомів, іонів, кластерів речовини, утворення зародків, зростання нової фази. Кінетика кожного процесу по-своєму впливає на структуру тонких плівок.

Технологічний процес виготовлення тонких покриттів поєднує в собі різноманітні процеси: підготовка деталей до напилення, формування покриттів, контроль отриманих покриттів.

Розглянемо основні принципи отримання покриттів у вакуумі найбільш розповсюдженими методами, серед яких можна виділити такі: термічні, іонно-плазмові та іонно-променеві [5,17].

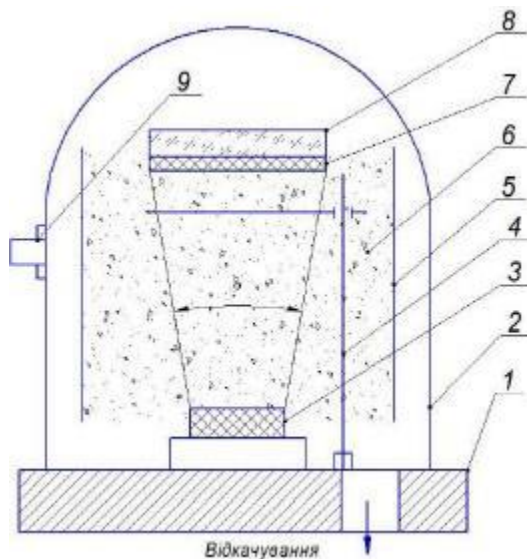
*Методи термічного випаровування* у вакуумі (резистивне, лазерне, електронно-променеве, вакуумно-дугове випаровування) є найбільш універсальними і отримали широке застосування за рахунок технологічності і простоти процесу нанесення покриттів різного призначення.

Вони характеризуються високою продуктивністю, можливістю контролю і автоматичної стабілізації основних технологічних параметрів у процесі нанесення покриттів, що забезпечує високу відтворюваність їх структурних характеристик, складу, оптичних і експлуатаційних властивостей [18, 20, 21].

Методи дозволяють наносити покриття з плівкоутворювальних матеріалів різного складу і природи. Термічні методи отримання покриттів полягають в нагріванні речовини в спеціальних випарниках до температури, при якій починається процес випаровування і конденсації парів речовини у вигляді тонких плівок на поверхні-мішені, яка розташована на деякій відстані від випарника, рисунок 1.2.

*Методи іонно-плазмового отримання покриттів* отримали широке розповсюдження завдяки своїй універсальності (можна формувати тонке покриття на поверхні підкладинки, здійснювати очищення поверхні підкладинки, травлення поверхні підкладинки для створення рисунка інтегральної схеми, тощо), можливості отримання покриттів тугоплавких матеріалів, а також хімічних з'єднань та сплавів заданого складу [17].

Дані методи отримання тонких покриттів базуються на тому, що матеріал катоду (мішені) піддається дії іонів, розпилюється (енергія іонів при цьому складає величину порядку сотень і тисяч електрон-вольт), а атомний потік, що утворився переноситься до підкладинки, де відбувається конденсація речовини і утворюється покриття [17].



- 1 – базова плита;
- 2 – вакуумна камера;
- 3 – матеріал, що розпилюється;
- 4 – заслінка;
- 5 – екран;
- 6 – потік частинок;
- 7 – утворене покриття;
- 8 – напилюваний виріб;
- 9 – напускач робочого газу.

Рисунок 1.2 – Схема процесу вакуумного напилювання покриттів

Сутність *методів іонно-променевого напилення* полягає в бомбардуванні мішені, матеріалу, що осаджується, пучком іонів з енергією до 5 кеВ, з наступним осадженням розпиленого матеріалу на підкладинку [17].

Даний метод найбільш ефективний при напиленні плівок багатокомпонентних матеріалів, алмазоподібних покриттів, різноманітних діелектриків, магнітних матеріалів [17].

В цілому, вибір того чи іншого способу отримання тонких покриттів залежить від вимог по якості покриття, а також від заданих властивостей покриттів, від обладнання і технологічного процесу, матеріалу плівки.

Переваги і недоліки вище зазначених вакуумних методів наведені в Додатку А (таблиця А.2) [5, 10, 12-18, 22-27, 28-31, 33-39, 41-43, 56-59].

Як видно із порівняльної характеристики (Додаток А, таблиця А.2), найбільш перспективним методом для застосування у даному науковому дослідженні є один з методів термічного випаровування, а саме резистивний метод отримання тонких покриттів. В даному методі використовується електрична енергія для нагріву матеріалу, який поміщено в тугоплавкий випарник, до температури при якій його атоми достатньо швидко починають випаровуватися.

При цьому, застосування даного методу для отримання функціональних покриттів на оптичних матеріалах, що відповідатиме основній меті дисертації обмежене рядом факторів: забруднення плівки матеріалом нагрівача, низький термін служби випарника, що вимагає його періодичної заміни та невеликий об'єм завантаження.

#### 1.2.2. Методи оброблення оптичних поверхонь концентрованими потоками енергії

Традиційні методи (механічне, хімічне, хіміко-механічне полірування) оброблення оптичних елементів на сьогоднішній день не завжди дають змогу отримувати оптичні вироби необхідної якості, тому виникає необхідність в розробці та дослідженні нових методів отримання поверхонь оптичних елементів із заздалегідь заданими експлуатаційними та якісними характеристиками [13].

Стан поверхні оптичних матеріалів визначає фізико-механічні та експлуатаційні характеристики готових виробів, тому якість виготовлених оптичних елементів має безпосередній вплив на технологічний рівень приладу

в якому вони знаходяться. Отже, дослідження з метою розробки методів для отримання поверхні з заданими властивостями є актуальним.

Перспективними технологіями для модифікації поверхні є технології в яких ефективним інструментом є КПЕ: електронів, іонів, фотонів, перевагою яких є: висока інтенсивність впливу, ефективність, локалізована зона впливу, продуктивність, швидкодія, екологічна чистота в порівнянні з традиційними технологіями [60-63].

Під дією таких потоків відбуваються різноманітні фазові, структурні, фізичні та інші зміни в поверхневих шарах оптичних елементів. Технологіям з використанням КПЕ притаманна висока точність і відтворюваність результатів.

На сьогоднішній день, найбільш перспективними є наступні методи поверхневого модифікування поверхні оптичних матеріалів, які ґрунтуються на використанні КПЕ [13, 60-65]: іонно-променевий, лазерний та електронно-променевий.

*Іонно-променеве поверхнєве оброблення* використовується для формування оптичних поверхонь з заданими характеристиками і топографією і дає можливість з високою точністю проводити модифікацію поверхневого шару для покращення його експлуатаційних властивостей [63, 66].

Сутність іонно-променевого полірування полягає в попередньому осадженні в западини рельєфу вихідної поверхні підкладки тонкої плівки нанорозмірної товщини, що за складом аналогічна до матеріалу підкладки. Подальше травлення матеріалу зразка на глибину, що приблизно дорівнює двом товщинам такої плівки призводить до зниження шорсткості поверхні [62, 66]. Іонно-променеве полірування можна представити у вигляді такого алгоритму оброблення [62, 66]:

- осадження тонкої плівки (товщина якої дорівнює приблизно половині висоти характерних виступів рельєфу) при застосуванні розпилення іонами кисню мішені з однакового матеріалу що і зразок, та іонного асистування процесу осадження;

- за допомогою нормально падаючого низькоенергетичного пучка іонів кисню здійснюють розпилення отриманої поверхневої структури на глибину, яка приблизно дорівнює двом товщинам осажденного шару;

- повторення технологічних операцій «осадження» та «розпилення» з поступовим зменшенням товщини осащеної тонкої плівки до набуття поверхнею необхідного стану ( $h_3 < h_2 < h_1$ ). Схема процесу іонно-променевого полірування представлена на рисунку 1.3.

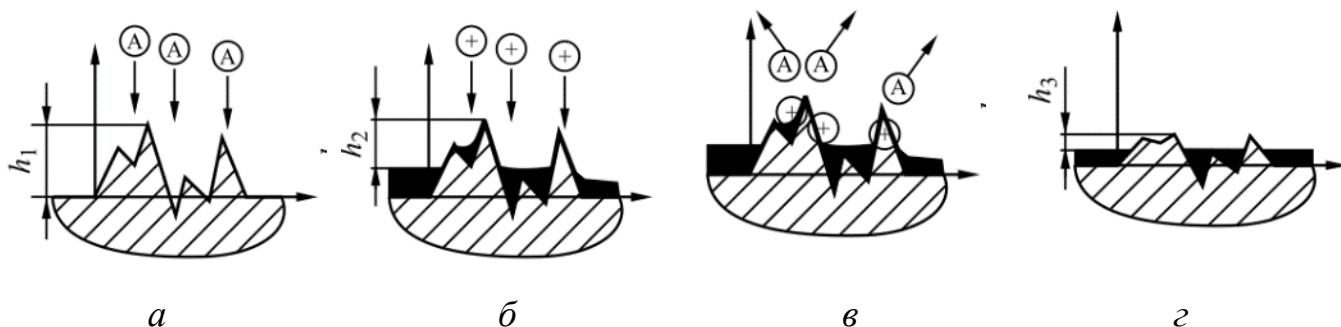


Рисунок 1.3 – Схема іонно-променевого полірування: осащення тонкої плівки (а), іонне бомбардування (б), видалення осащеної плівки (в), рельєф після оброблення іонним променем (г) [62]

Технологія іонно-променевого полірування дає можливість зменшити виступи мікрорельєфу майже у 2 рази в порівнянні з вихідною поверхнею, а на ділянках поверхні кварцу площею  $2,5 \times 2,5$  мкм, максимальна висота виступів не перевищує 0,8 нм [62, 66]. Тривалість процесу іонно-променевого полірування складає десятки хвилин в залежності від рельєфу вихідної поверхні.

Переваги іонно-променевої технології полягають в наступному [67-69]:

- висока спрямованість впливу, що забезпечує високу прецизійність;
- можливість отримання вертикальних сходинок при травленні через маску;
- можливість управління енергією іонів в широких межах;
- точність і простота контролю процесу оброблення шляхом випромінювання струму пучка іонів;
- висока однорідність і відтворюваність оброблення.

До недоліків даної технології відносяться [60, 61, 69-73];

- низькі швидкості травлення (0,1-1 нм/с);

- значні радіаційні та теплові впливи, що викликають руйнування контактних масок та деградацію електрофізичних параметрів структури;
- не забезпечує необхідної для масштабного виробництва продуктивності виготовлення оптичних елементів;
- дозволяє зменшити глибину тріщинуватого шару, але при цьому збільшується шорсткість поверхні, за рахунок утворення дефектів;
- дозволяє зменшити шорсткість поверхні, але при цьому глибина тріщинуватого шару залишається незмінною.

Перспективною технологією також є *лазерне модифікування поверхні оптичних матеріалів* [74-78]. В результаті взаємодії теплового лазерного випромінення великої інтенсивності з речовиною відбуваються зміни структури та зміни оптичних властивостей [61].

Існує три основних способи лазерного полірування, рисунок 1.4 [61].

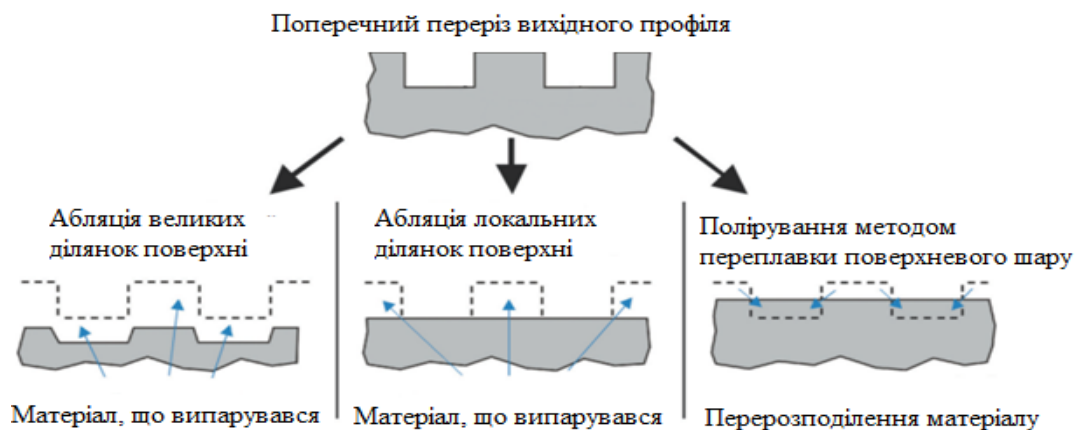


Рисунок 1.4 – Схема отримання профілю оптичної поверхні за різних варіантів процесу лазерного полірування (зліва – направо): абляція великих областей поверхні, абляція локальних ділянок поверхні, полірування методом переплавлення поверхневого шару матеріалу

В таблиці 1.1 наведено значення шорсткості поверхні до і після лазерного оброблення (за даними [61]), які доводять високу ефективність методу.

Таблиця 1.1 – Результати дослідження шорсткості оптичної поверхні в процесі лазерного полірування різних сортів оптичного скла [61]

Сорт скла	Шорсткість поверхні до лазерного оброблення, нм	Шорсткість поверхні після лазерного оброблення, нм
Свинцеве скло	13300	2500
Кварцове скло	150 – 2000	10 – 50
TRC-33	500	1

В роботі [77] показано, що в результаті лазерного полірування поверхні кварцового скла, параметр Ra зменшується в 5...8 разів, а параметр Rz – у 8...12 разів. Проте, в результаті перегріву кварцових пластин на поверхні спостерігається формування борознин (рисунок 1.5, а), а в ряді випадків – розтріскування зразків, рисунок 1.5, б.

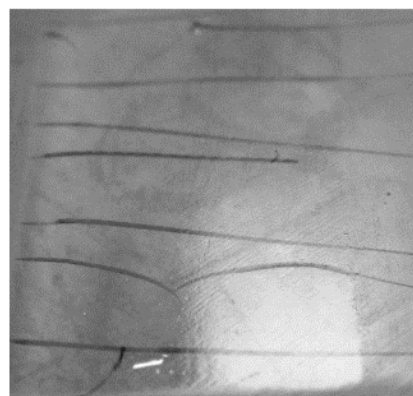
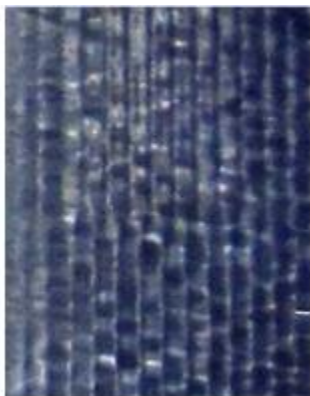


Рисунок 1.5 – Дефекти, які виникають внаслідок недотримання теплового режиму полірування кварцового скла: утворення борознин (а) поява тріщин (б) [77]

Технологія лазерного полірування має наступні переваги [60,72,73,80-84]:

- лазерне випромінювання призводить до змін, як на поверхні так і в об'ємі матеріалу, що дозволяє створювати мікро- та нанорозмірні структури;
- можливість здійснювати різні види модифікації прозорих діелектриків (змінювати показник заломлення, формувати наноканали тощо);
- можливість плавного регулювання лазерного випромінювання;

- висока концентрація енергії у зоні оброблення матеріалу ( $\sim 2 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>).

Незважаючи на значні переваги, технологія лазерного полірування має ряд недоліків [68, 72, 73, 78-85]:

- висока вартість та складність обладнання;
- локальна модифікація скла може супроводжуватись формуванням нанорозмірних періодичних зон розушільнення та утворенням мікропорожнин;
- низька повторюваність технологічного процесу (ККД – 40...60%, швидкість оброблення до 50 мм/с);
- складність керування потужним лазерним променем.

### 1.3. Особливості застосування методу електронно-променевого модифікування поверхонь оптичних елементів

Серед технологій модифікування поверхонь оптичних елементів за даними робіт наступних вчених: Ващенко В. А., Лісоченка В. М., Канашевича Г. В., Дудка Г.В., Яценко І. В. та інших [12, 13, 91-110], найбільш прогресивним і таким, що інтенсивно розвивається, є термічне, низькоенергетичне ( $E \leq 10$  кеВ) електронно-променево оброблення (ЕПО) з використанням потоку електронів стрічкової форми (генерується електронно-променевою гарматою (ЕПГ) Пірса, яка дає можливість отримувати оптичні елементи з покращеними якісними та експлуатаційними характеристиками.

Слід зазначити, що ЕПО не є альтернативною технологією оброблення оптичної поверхні уже існуючим традиційним методам формоутворення – вона є фінішною операцією оброблення оптичної поверхні, яка дозволяє виправити недоліки від попередніх методів оброблення (дефектний та тріщинуватий шар наявність яких призводить до зниження експлуатаційних характеристик готових оптичних виробів). Забезпечення необхідної якості поверхні оптичних елементів дає поєднання ЕПО з попереднім механічним обробленням [12, 13, 106-110].



При цьому, застосування ЕПО забезпечує високу ефективність такого технологічного процесу і дозволяє вирішувати ряд важливих завдань в різних галузях промисловості і наукових дослідженнях.

Як відомо [13, 111], в основі механізму взаємодії сформованого у вакуумі електронного променя з оптичною поверхнею закладено процес перетворення кінетичної енергії електрона у теплову, що призводить до локального нагрівання, плавлення або випаровування речовини. Електрони проникають в тверде тіло, де розсіюються в результаті взаємодії з атомами речовини (відбувається передача частки енергії частинкам речовини і водночас відхилення електронного потоку від свого первинного напрямку руху) [111-114]. Глибина проникнення складає порядку  $10^{-9} \dots 10^{-8}$  м і залежить від прискорюючої напруги ( $U_{пр}$ ) та від властивостей матеріалу [109].

При взаємодії низькоенергетичного сфокусованого потоку електронів стрічкової форми (який сформовано ЕПГ Пірса з ниткоподібним катодом) з оброблюваним матеріалом на його поверхні виникає «ванна розплаву» глибиною  $\sim 10 \dots 150$  мкм [110]. В залежності від технологічних режимів оброблення, після охолодження утворюється хвиляста або плоска поверхня, яка за своїми фізико-хімічними, оптичними, експлуатаційними властивостями відрізняється від основного матеріалу [13].

При цьому сучасне забезпечення ЕПО дозволяє концентрувати високі енергії в зоні оброблення, можливість автоматизації процесів оброблення. Також ЕПО дає змогу усунути дефектний шар (що утворився на попередніх стадіях оброблення) і провести зміну фазового складу поверхневого шару.

Це в свою чергу призводить до зміни механічних та хімічних властивостей поверхневих шарів [92]. За даними роботи [13] можна виділити 3 основні стадії теплового впливу (СТВ) електронного потоку на оптичний матеріал, рисунок 1.6.

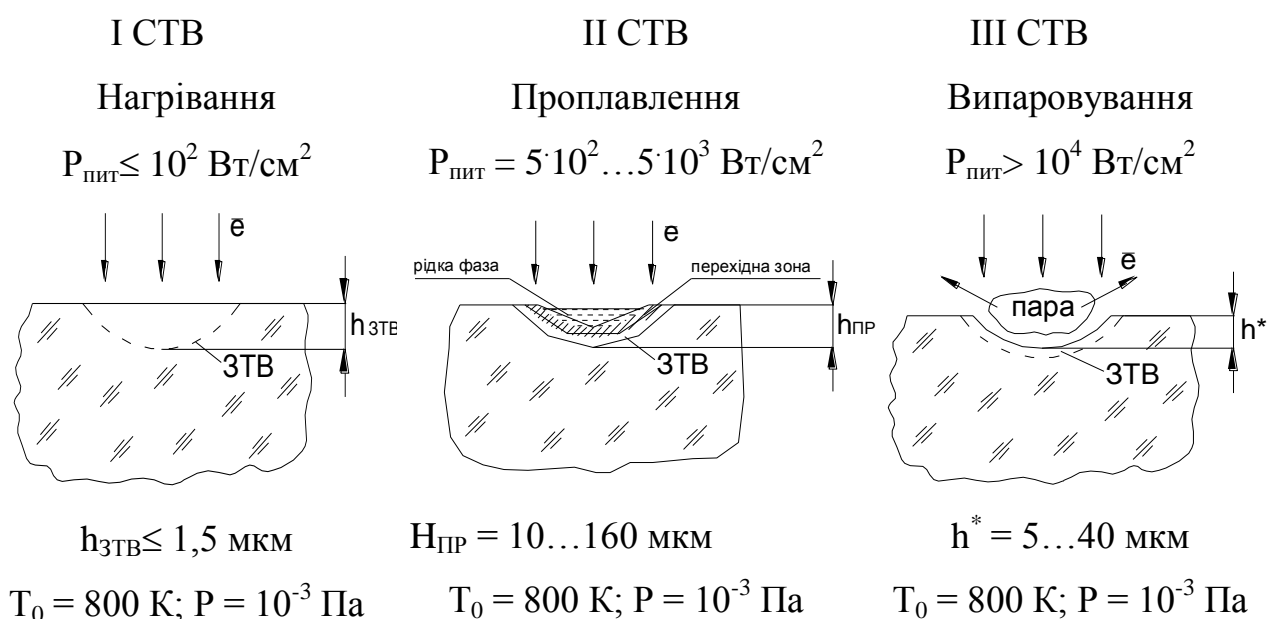


Рисунок 1.6 – Стадії термічного впливу низькоенергетичного електронного потоку на оптичний матеріал у вакуумі [13]

На I стадії теплового впливу після охолодження на поверхні утворюється кварцеподібна плівка товщиною до 100 Å. Також відбувається підвищення хімічної стійкості і незначне зниження шорсткості вихідної поверхні, а дефектний шар стає більш однорідним.

На II стадії теплового впливу відбувається утворення рідкого стану та десорбція іонів  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  у поверхневому шарі, а також ущільнення та зміна структури (після охолодження поверхневий шар стає бездефектним та монолітним). На поверхні утворюється кварцеподібна плівка товщиною до 200 Å. Для II СТВ характерне значне зниження шорсткості поверхні (2,5...5 нм), усунення дефектного і тріщинуватого шарів (при глибині проплавлення 10...20 мкм), зменшення показника заломлення, покращення прозорості, підвищення хімічної стійкості [13].

На III стадії теплового впливу відбувається процес інтенсивного кипіння та випаровування речовин поверхневого шару оптичного скла [13].

При неправильно підібраних технологічних режимах ЕПО або охолодження на поверхні оптичного скла утворюються мікронерівності (хвилястості) або

відбувається руйнування зразків (розтріскування, утворення сколів, відшаровування), рисунок 1.7.

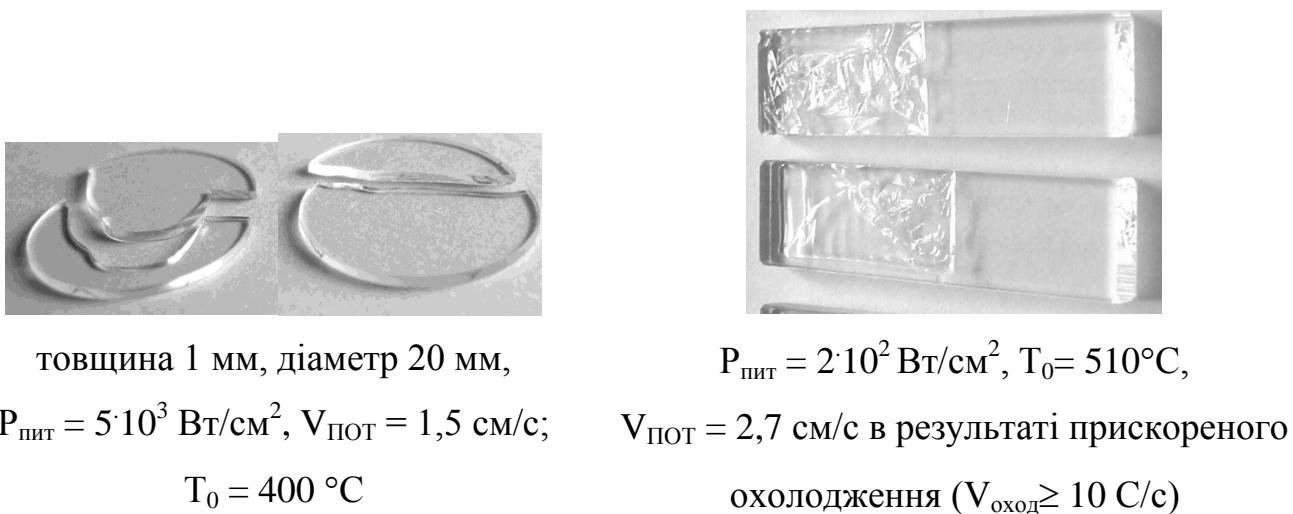


Рисунок 1.7 – Характерні руйнування пластин з оптичного скла [13]

В процесі ЕПО відбувається видалення дефектів з поверхні і приповерхневого шару. Це призводить до зниження оптичних витрат і підвищення експлуатаційних властивостей оброблюваних виробів.

Використання ЕПО, як фінішної операції, дає змогу знизити шорсткість поверхні [13].

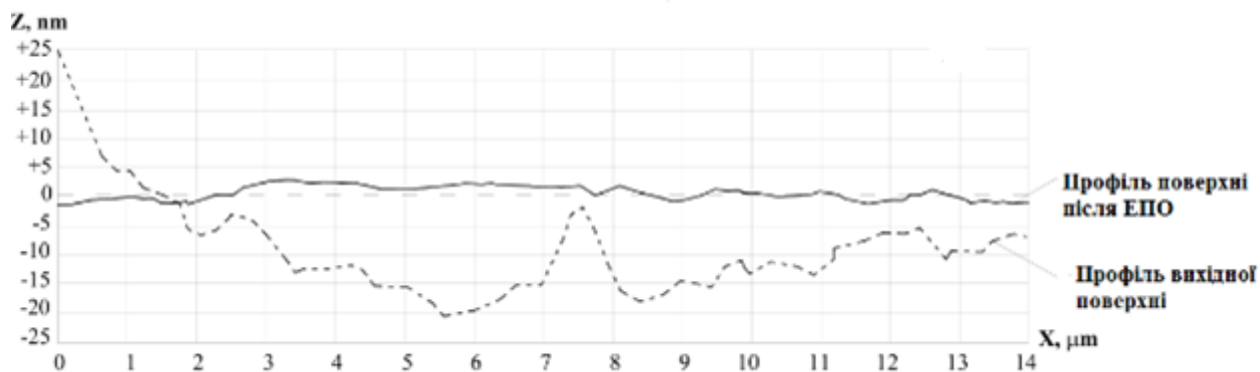


Рисунок 1.8 – Профіль вздовж оптичної поверхні (10×10 мкм) виробу зі скла К8 [13]

Таким чином, модифікування поверхні електронним променем дозволяє в 1,8...2,1 рази підвищити стійкість скла до розтягуючих напружень і в 3...4 рази збільшити міцність [94].

В той же час, як зазначено в роботі [96] ЕПО підкладинок з боролантанового скла дозволяє отримувати бездефектну атомарно-гладку поверхню, підвищити коефіцієнт інтегрального пропускання світла деталей на 0,2% з 0,9888 до 0,990 та зменшити відсоток браку по параметру чистоти на 5...7%. ЕПО має суттєвий вплив на поверхневі дефекти оптичного скла (точки, подряпини): в результаті впливу електронного потоку на поверхню оптичного скла дрібні дефекти зникають, а більш крупні згладжуються, рисунок 1.9 [115].

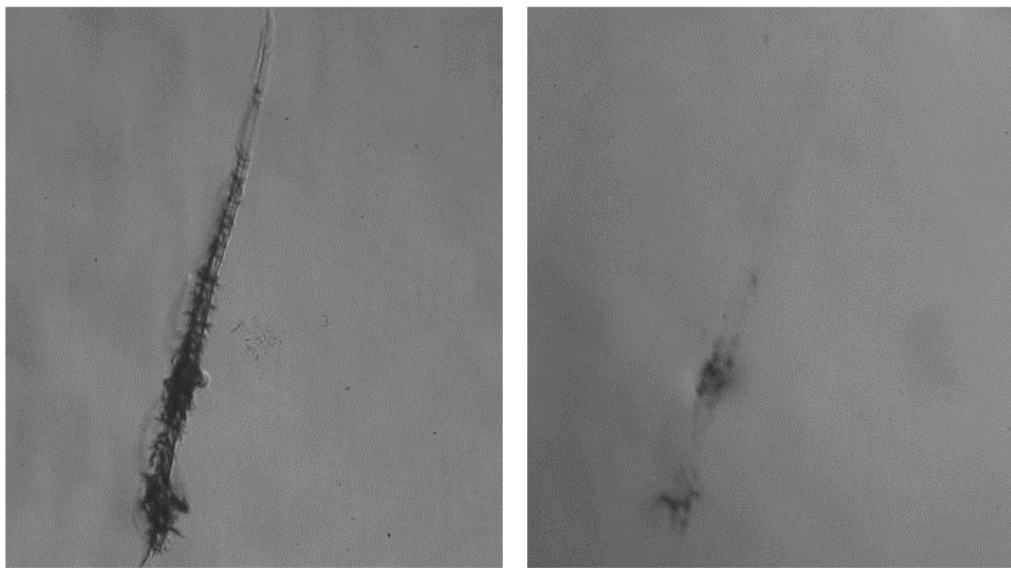


Рисунок 1.9 – Згладження поверхневих дефектів на оптичному склі при ЕПО [115]

Як зазначено в роботі [96]: після ЕПО мікротвердість поверхні елементів збільшується у 1,3...1,7 рази, формуються зміцнені шари товщиною до 210...230 мкм, відбувається зміна структури шарів і їх гомогенізація, а поверхня за фізико-механічними властивостями та хімічною структурою стає наближеною до кварцового скла на глибину до 20...40 мкм.

До параметрів, які мають безпосередній вплив на режими та якість оброблення, відносять струм розжарювання, швидкість оброблення, струм потоку, відстань від ЕГ до оптичного скла [96].

Таким чином, ЕПО оптичних поверхонь відноситься до локальних методів поверхневого термічного оброблення, що має наступні переваги [12, 13, 92-94, 96, 97, 99, 102-104, 106, 109, 110]:

- високу концентрацію і локальність енергії, що підводиться в зону оброблення (дозволяє створювати нові поверхні оптичних елементів з унікальними структурами і формувати поверхні з високими експлуатаційними властивостями);
- економічні і технологічні переваги в порівнянні з іншими методами на основі КПЕ;
- гнучке управління технологічними параметрами процесу (прискорююча напруга ( $U_{пр}$ ), струм електронного потоку ( $I_{пот}$ ), швидкість оброблення ( $V_{обр}$ );
- можливість регулювання параметрів ЕПО в широкому діапазоні, що дає можливість цілеспрямовано формувати структуру та властивості поверхневого шару;
- ЕПО призводить до підвищення механічної міцності, оптичної та хімічної стійкості, більшої оптичної щільності в порівнянні з вихідною поверхнею;
- високий ККД та універсальність.

Проте, не зважаючи на вказані переваги і велику кількість досліджень з використанням ЕПО, для підвищення якості і експлуатаційних характеристик поверхневих шарів оптичних матеріалів, не достатньо широко вивчені можливості застосування даної технології для модифікування поверхні ОЕ різноманітного призначення перед нанесенням тонких плівок на їх поверхні, а також модифікування отриманих тонких плівок з використанням ЕПО (якщо така операція забезпечується технологічним процесом), також недостатньо досліджені та відсутні дані про гнучке керування потужністю електронного променя ЕПГ Пірса під час оброблення ОЕ та не наведені науково-обґрунтовані рекомендації по вибору оптимальних режимів ЕПО, для створення якісних тонкоплівкових елементів.

Усе це потребує подальшого удосконалення методичного, математичного та програмно-апаратного забезпечення технологічного процесу комбінованого

оброблення тонких покриттів на оптичних поверхнях методом низькоенергетичного стрічкового ЕПО.

#### 1.4. Методи і засоби формування, керування та діагностування параметрів електронного потоку

Основними засобами формування електронного потоку у вакуумі, як у промислових (технологічних, зварювальних та інших), так і науково-дослідницьких (електронних мікроскопів, пристроїв електронної літографії, тощо) електронно-променевих установках є електронні гармати (ЕГ) [109,117,119-121].

ЕГ призначені для формування інтенсивного потоку електронів певної конфігурації, необхідної густини струму, з необхідним кутовим розходженням та з рівномірним розподіленням густини струму по його перерізу та мають високу надійність протягом тривалої експлуатації. Усі методи керування конфігурацією і фокусуванням електронних потоків пов'язані із дотриманням певних значень керуючої напруги та сили струму.

В технологіях електронного оброблення поверхонь великої площі та протяжності знайшли широке застосування електронно-променеві гармати (ЕПГ) Пірса [117], які використовуються для формування прямолінійних, ламінарних електронних потоків простої форми: стрічкової, циліндричної або конічної [118]. В електронно-променевих технологіях саме ЕПГ Пірса отримали широке розповсюдження, оскільки мають нескладну конструкцію електродів, фокусують електронні потоки з великим первеансом і піддаються досить точному і простому розрахунку. Саме через високу ефективність ЕПГ Пірса, останні використовують в якості інструмента для створення стрічкового електронного потоку при термічних технологічних процесах [109,110].

Проте, класична конструкція ЕПГ Пірса, яка використовується для формування низькоенергетичного стрічкового електронного потоку має наступні недоліки [109,110] :

- нерівномірність розподілу електронного потоку вздовж стрічки, що виникає через провисання вольфрамового дріт'яного катоду при його нагріванні до робочої температури та з відтоком тепла на його затискачах;
- нестабільність технологічних параметрів ЕПГ з часом (через старіння та зношення катоду);
- складність юстування катоду та окремих вузлів гармати.

Для підвищення ефективності керування ЕПГ використовують різноманітні схеми підключення з використанням керуючого електроду [109,114]. Деякі з таких схем наведені на рисунку 1.10. В цілому застосування керуючих електродів дозволяє формувати електронні потоки з більшим вихідним первеансом [114, 121].

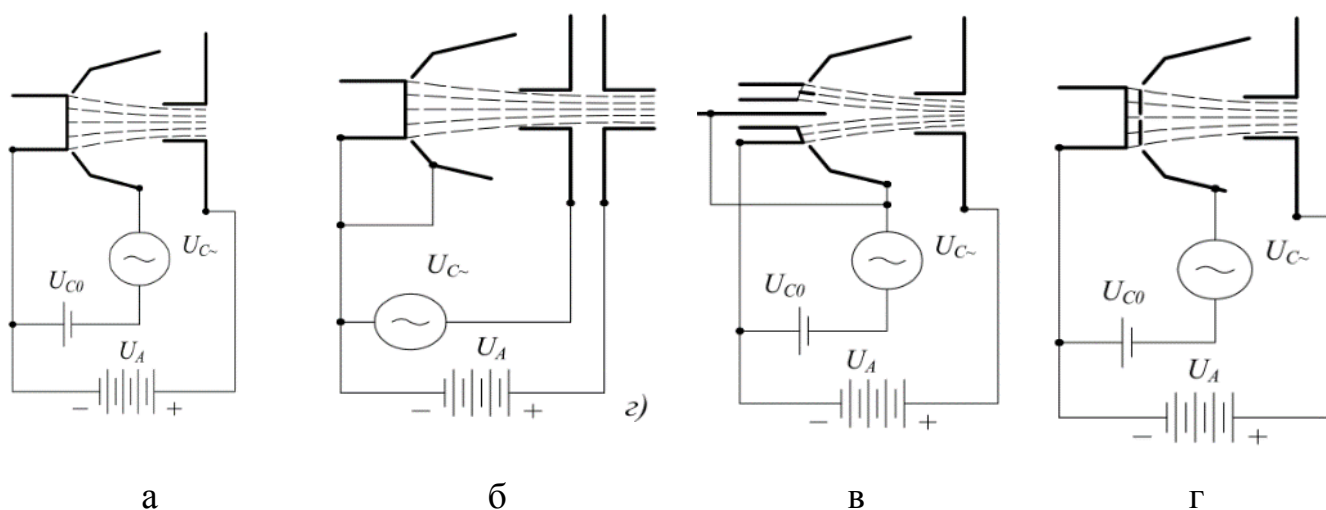


Рисунок 1.10 – Схеми ЕПГ з керуючими електродами [114,121]:

а – з керуючим прикатодним електродом; б – з первинним анодом (товстою діафрагмою); в – зі штирем; г – з керуючою сіткою;  $U_{C0}$  – постійна напруга керуючого електроду;  $U_{C~}$  – модулююча напруга;  $U_a$  – анодна напруга

ЕПГ з керуючими електродами дозволяють формувати електронні потоки з більш високим вихідним первеансом, це пов'язано з наявністю двох електродів з регулюємими потенціалами  $U_c$ ;  $U_a$ , що дає можливість в широких межах змінювати не тільки струм  $I$ , але й енергію електронного потоку на виході з гармати, яка визначається значенням  $U_a$  (зміна величин  $I$  та  $U_a$  відбувається практично незалежно одна від одної) [114].

Для забезпечення якості та повторюваності ЕПО необхідно не лише контролювати параметри процесу, але й проводити діагностику форми електронного потоку для усунення невідповідностей між розрахунковою та реальною формою електронного потоку та гнучкого керування густиною розподілу електронного потоку.

Для визначення енергетичних параметрів електронного потоку використовують різні методи і пристрої, які за принципом дії можна поділити на прямі та непрямі [122]. Прямі методи використовуються для вимірювання характеристик безпосередньо самих електронних потоків (струму, густини струму, розподілення по швидкостям, інше). Непрямі методи використовуються для реєстрації і аналізу електричних і магнітних полів електронного потоку, або при взаємодії електронів з середовищем або об'єктами, які розміщені на траєкторії руху електронного потоку.

Розглянемо найбільш поширені на практиці методи визначення енергетичних параметрів електронного потоку.

Так, серед зондових методів діагностування параметрів електронного потоку найбільш простим, універсальним та розповсюдженим є метод обертального зонду, рисунок 1.11 [122-128]. В методі використовується один або декілька тонких зондів (виготовлених з тугоплавких металів), які закріплені на важелі, закріпленому на валу електродвигуна, який обертається з великою швидкістю [118]. Зонди перетинають електронний потік, що досліджується, перпендикулярно до його осі відбираючи при цьому невелику частину струму електронного потоку.

Недоліками методу є [122, 124, 125]: неможливість визначити розподіл густини струму вздовж стрічки; в процесі зондування знімаються характеристики робочої і неробочої частини електронного потоку, що в результаті призводить до виникнення похибок; під дією електронного потоку зонд може частково руйнуватися (ресурс зонда не перевищує 30...40 дослідів), що призводить до викривлення зондових характеристик. Похибки, які виникають при вимірюванні енергетичних параметрів електронного потоку



обумовлені впливом вторинних електронів, відхиленням зонду від прямолінійності, зміною розміру зондів під впливом електронного потоку [124], тощо, чим зменшують точність визначення цих характеристик.

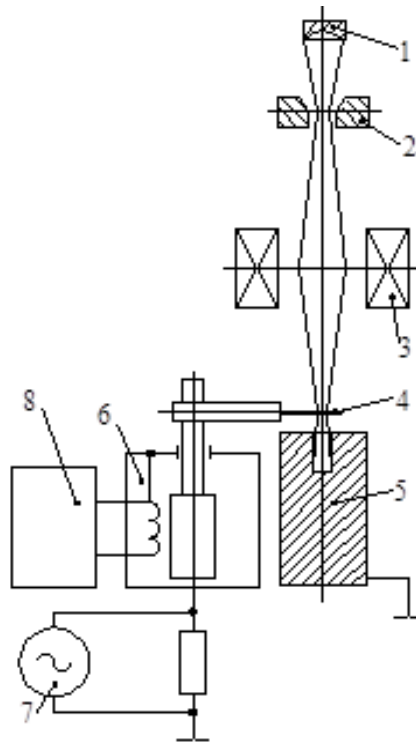


Рисунок 1.11 – Схема реалізації методу обертального зонду [122, 126, 127]:

1 – катод; 2 – анод; 3 – фокусуюча система; 4 – обертальний зонд; 5 – колектор;  
7 – осцилограф; 8 – джерело живлення електродвигуна

Для вимірювання параметрів електронних потоків застосовують також метод тонкоплівкового зонду, рисунок 1.12 [122].

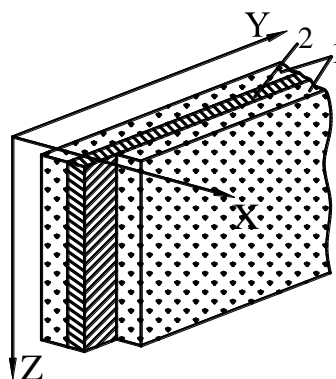


Рисунок 1.12 – Схема тонкоплівкового зонду [122]:

1 – ізолюючі пластини; 2 – провідна плівка

Суть методу полягає в тому, що при русі електронного потоку по торцю зонда вимірюється сила струму в плівці. Тонкоплівковий зонд складається з двох діелектричних пластин 1, на одну з яких напилюється тонка металева плівка 2, на яку наклеюється діелектрична пластина, потім торець виробу полірується в площині X-Y (ця поверхня є робочою поверхнею зонда).

Даний метод дає змогу отримувати форму поперечного перерізу електронного променя, з отриманих зондових характеристик можна розрахувати розподіл густини струму по перерізу в електронному потоці. Використовуючи тонкоплівкові зонди можна досліджувати електронні потоки розміри яких складають 5-20 мкм [122].

Для отримання інформації про структуру променя використовують електронний зонд [122]. В цьому методі в якості зонду використовується додатковий не термічний електронний промінь невеликої потужності, який в процесі вимірювання взаємодіє з досліджуваним термічним електронним потоком. Даний метод використовують для побудови залежності сили струму потоку і фокусування, вимірювання положення мінімального перерізу променя. Похибки при вимірюванні даним методом обумовлені вторинною емісією електронів просторовим зарядом парів металів [122].

Метод «краю пластин» використовують в системі діагностування електронного променя в зварювальних установках. Електронний промінь більшу частину часу спрямований на зразок і тільки короткочасно відхиляється в іншу сторону. Промінь перетинає край датчика, який з'єднаний з заземлюючим електродом через струм витоку, а в ланцюзі датчика формується імпульс струму. По крутизні фронту імпульсу наростання розраховують розподілення густини струму в поперечному перерізі променя. Даний метод дає змогу розрахувати просторове розподілення потужності в промені, положення фокусу, мінімальний радіус. Якщо в електронній гарматі використовують дротяний або стрічковий катод – точність розрахунків знижується [129].

Серед безконтактних методів визначення густини розподілу енергії електронного променя найбільшого розповсюдження отримав метод з використанням рентгенівського датчика з колімованою насадкою, який здійснює вимірювання рентгенівського випромінювання з поверхні оброблюваних деталей [137-138]. Датчик розташовують таким чином, щоб електронний потік, який за допомогою відхиляючої системи виводять з зварювальної ванни, перетинав зону огляду (контролю) колімованого датчика, яка має вигляд вузької площини ширина якої  $h_k$  менше діаметра променя. Даний метод використовують в автоматизованих системах для дослідження геометричних параметрів розподілу густини енергії електронного потоку [130].

Одним з найбільш універсальних методів вимірювання радіального розподілення інтенсивності променя є метод в якому використовують циліндр Фарадея [131-136]. На рисунку 1.13 представлена схема, в складі якої використовують цей датчик.

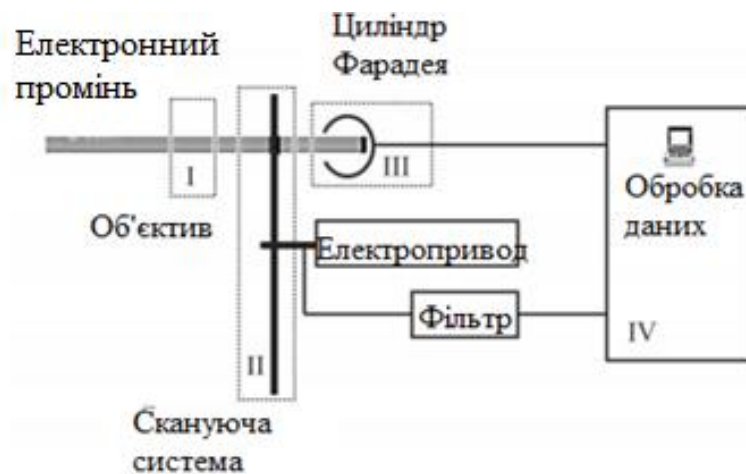


Рисунок 1.13 – Схема вимірювання радіального розподілу інтенсивності потоку: I – об'єктив (як правило, частина гармати); II – скануючий (модуляційний) пристрій; III – циліндр Фарадея; IV – блок оброблення даних і дисплей [134]

При вимірюванні параметрів інтенсивних потоків (потужність, яких перевищує 1 кВт і доходить до сотен кВт) потік має достатню енергію для руйнування більшості датчиків або струмоприймачів.

Пристрій для зондування, який, як правило, складається із скануючого дроту, точкового отвору, барабана або диску, які містять щілини дозволяють вимірювати поглинуту або прохідну частину електронного потоку за допомогою датчика Фарадея, який піддається опроміненню на протязі малого часу. Даний метод зондування має гарну стійкість до електричних шумів і погіршення сигналу, яке виникає через зворотнє розсіювання, оскільки датчик закритий і екранований, і може бути реалізований за допомогою простого і компактного обладнання.

Безконтактні методи в більшості випадків використовуються для контролю середніх та високоенергетичних потоків аксіальної форми і не можуть бути застосовані для вимірювання енергетичних параметрів низькоенергетичного електронного потоку стрічкової форми, який застосовується при обробленні оптичних матеріалів [122].

На сьогоднішній день електронний промінь є складним об'єктом дослідження, тому, не зважаючи на велику кількість існуючих систем діагностування, не існує універсального методу для дослідження всіх властивостей будь-яких електронних потоків[114].

### 1.5. Висновки до розділу

В результаті проведеного аналізу літературних джерел та джерел з Інтернету встановлено:

- стан та шорсткість поверхні оптичних елементів є одним з домінуючих факторів, який визначає її властивості (фізико-механічні, хімічні та експлуатаційні), а також властивості нанесених на неї тонких покриттів;
- застосування високоінтенсивних методів поверхневого оброблення оптичних елементів з використанням КПЕ має певні переваги перед традиційними методами. Так, використання КПЕ дає змогу сформувати унікальні фізико-хімічні стани матеріалу в поверхневому шарі, що дозволяє

виготовляти оптичні елементи з високою точністю та низькою шорсткістю поверхні;

- для отримання найбільш раціональних режимів оброблення оптичних елементів необхідно враховувати властивості поверхні, що формується, і які безпосередньо залежать від фізико-хімічних процесів при ЕПО;

- існуючі системи для керування та діагностування електронного потоку не дозволяють в повній мірі здійснювати оперативний контроль та керування розподілом енергії в електронному потоці. Тому для підвищення якості оптичних елементів при ЕПО необхідно не тільки контролювати параметри процесу, але й проводити його оперативне діагностування для гнучкого керування густиною розподілу електронного потоку.

Таким чином, підвищення якісних характеристик оптичних елементів шляхом розробки нового та удосконалення існуючого методичного, математичного, технічного та програмного забезпечення, що в цілому представляє собою комбіновану технологію електронно-променевого оброблення є важливою і актуальною задачею.

В результаті було сформульовано мету та задачі досліджень.

Мета роботи полягає в підвищенні якісних характеристик оптичних елементів (зменшенні кількості макро- та мікродефектів поверхні, залишкової шорсткості поверхні, підвищенні їх механічної міцності) внаслідок поєднання технології отримання тонких покриттів на їх поверхнях та гнучкого керування процесом електронно-променевого оброблення в одному технологічному циклі.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі основні задачі:

1. На основі аналізу літературних джерел визначити фактори, які впливають на стан поверхні та якісні характеристики оптичних елементів і обґрунтувати наукові задачі підвищення якості оптичних елементів комбінованим електронно-променевим обробленням.

2. Запропонувати комплекс методик по проведенню керованого комбінованого електронно-променевого оброблення, дослідженню якості підготовки та модифікування оптичних елементів, отриманих із застосуванням такого оброблення.

3. Розробити математичну модель теплового впливу електронного потоку на поверхню оптичного елементу.

4. Встановити закономірності впливу робочих параметрів електронно-променевої гармати Пірса (напруги на модуляторі, прискорюючої напруги, струму розжарення) на енергетичні параметри електронного потоку

5. Здійснити модернізацію базового технологічного обладнання для проведення на його основі комбінованого електронно-променевого оброблення в одному циклі, визначити раціональні режими такого оброблення.

6. Провести експериментальні дослідження з визначення якісних характеристик оптичних елементів отриманих комбінованим електронно-променевим обробленням.

## **РОЗДІЛ 2.**

### **МЕТОДИЧНА БАЗА ТА ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Для досягнення мети та вирішення основних задач дисертаційного дослідження в розділі проводиться удосконалення існуючого та розроблення нового методичного та технічного забезпечення технологічного експерименту.

Представлені методики із залученням автора дисертаційного дослідження [136-145]: модифікування поверхонь оптичних елементів з використанням комбінованої електронно-променевої технології; визначення та контролю стрічкового електронного потоку; оцінки якості поверхні оптичних виробів методом атомно-силової мікроскопії.

Розглянуто удосконалене автором технологічне вакуумне обладнання для комбінованого електронно-променевого оброблення (поєднання в одному технологічному циклі методу резистивного осадження тонких плівок та електронно-променевого оброблення) в частині впровадження схеми регулювання параметрами гармати Пірса, що дозволяє в режимі реального часу проводити гнучке управління процесом ЕПО шляхом зміни вихідних параметрів оброблення [110, 147-157].

#### **2.1. Основні характеристики об'єктів дослідження**

В якості зразків використовувалися підкладинки із оптичного безкольорового скла марки К8 (ГОСТ 3514-94) (диски діаметром 20, 30, 44 мм, товщиною 2, 4, 6 мм, а також прямокутної форми 50x40x20 мм) загальною кількістю 60 штук та ТК14 (ГОСТ 3514-94) (пластини розмірами 20×20 мм, товщиною 1,5 мм) загальною кількістю 30 штук, а в якості тест-об'єктів – фотопластини 60×40 мм товщиною 2 мм (ОСТ 3-4931-81).

Основні фізико-механічні й теплофізичні характеристики оптичного скла, яке використовувалося для досліджень представлені у таблиці 2.1 [139].

Таблиця 2.1 – Основні теплофізичні та фізико-механічні характеристики оптичного скла (K8, ТК14)

Характеристика	K8	TK14
Густина , $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2,51	3,51
Коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha_T \cdot 10^{-6}$ , К <sup>-1</sup>	7,6	6,9
Модуль Юнга, $E \cdot 10^{10}$ , Па	8,2	6,9
Модуль зсуву, $G \cdot 10^{10}$ , Па	3,33	3,38
Коефіцієнт Пуасона, $\mu$	0,206	0,261
Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda$ , Вт/м·К	1,08	0,72
Питома теплоємність, $C$ , Дж/кг·С	710	460
Критичні значення термпружних напружень, $\sigma^*$ , МПа	21	16,3

## 2.2. Комплекс методик для проведення експериментальних досліджень

### 2.2.1. Методика модифікування поверхонь оптичних матеріалів комбінованим електронно-променевим впливом

Метою застосування технології комбінованого електронно-променевого впливу (КЕПВ) є підвищення якості поверхонь оптичних матеріалів (зменшення шорсткості поверхні, поруватості, збільшення мікротвердості та зносостійкості) після оброблення стрічковим електронним потоком.

Основна ідея удосконалення технології КЕПВ полягає в поєднанні в одному технологічному циклі процесу попереднього нагріву поверхні оптичного матеріалу, електронно-променевого оброблення з подальшим нанесенням тонких покриттів резистивним методом та їх оброблення стрічковим електронним потоком. Технологічний процес комбінованого оброблення проводиться в такій послідовності (рисунок 2.1)



## **Технологічна послідовність комбінованого електронно-променевого оброблення оптичних елементів**



Рисунок 2.1 – Послідовність проведення комбінованого електронно-променевого оброблення оптичних матеріалів

*Підготовка поверхні оптичного матеріалу.* Якість та техніко-експлуатаційні характеристики тонкої плівки, що формується, залежить від ступеня чистоти поверхні підкладки. Наявність забруднень на поверхні підкладки суттєво впливає на ступінь адгезії до них тонких плівок та їх електрофізичних властивостей, а також призводить до зниження відсотку виходу готових виробів. Правильна підготовка поверхні є обов'язковою для отримання якісних оптичних виробів.

Очистка оптичних деталей є складним технологічним процесом, який складається з послідовного виконання таких технологічних операцій: очищення, промивання, сушіння. Для якісного очищення підкладок від наявних забруднень необхідно застосувати технологічний процес, який би дав змогу поєднати ряд послідовних операцій для видалення з поверхонь різноманітних типів забруднень.

Найбільш ефективним способом підготовки поверхні оптичного скла є спосіб який поєднує механічне тонке очищення, наступне ультразвукове очищення та подальший нагрів у вакуумі [13].

Механічне тонке очищення і знежирювання здійснюється за допомогою розчину, до складу якого входить дистильована вода, карбонат кальцію та 25% розчину нашатирного спирту в масовій пропорції 6:2:2. Батистову серветку змочують у підготовленому розчині та круговими рухами протирають всю поверхню скляної підкладинки. Для усунення забруднень поверхня підкладинки оброблюється з двох сторін. Наступним етапом є очищення поверхні скляної підкладинки від залишків суміші в підігрітій до 50...60 °С дистильованій воді. Процедура проводиться декілька разів. Після відмивки в підігрітій воді підкладинки відмиваються холодною водою (15...20 °С) шляхом занурення у воду.

Після проведення першого етапу попередньої очистки заготовок необхідно здійснити візуальний контроль якості проведеної очистки. Огляд поверхонь заготовки дасть можливість впевнитись у відсутності на поверхні скла тріщин та сколів, а також видимих забруднень.

Наступний етап очищення – ультразвукове очищення – призначене для усунення окисних плівок, видалення забруднень, прискорення процесу очищення мікрорельєфної поверхні скла. При застосуванні ультразвукової ванни, в розчині, що використовується для очищення поверхонь оптичних заготовок, створюються змінні стискаючі і розтягуючі напруження, під дією яких утворюються кавітаційні бульбашки. Ультразвукове очищення (УЗО) проводилось з використанням приладу УЗГ-20Д в ультразвуковій ванні. Робочим розчином УЗО виступав етиловий спирт найвищого очищення [13]. Процес очищення триває протягом 20 хв при частоті 20...50 кГц. Після УЗО поверхня скляної підкладинки промивається в деіонізованій воді в декілька циклів. Після промивки в деіонізованій воді підкладинку необхідно виймати вертикально ребром, щоб на поверхні залишилась мінімальна кількість рідини. При цьому, залишки рідини після промивки усувають потоком повітря або

шляхом центрифугування. Сушіння поверхні проводиться потоком повітря протягом 3...5 хвилин [140]. Для запобігання повторного забруднення поверхні оптичного скла внаслідок адсорбції молекул різних речовин з навколишнього середовища необхідно мінімізувати час перебування очищених зразків на повітрі перед завантаженням у вакуумну камеру або помістити їх в ексикатор.

Для контролю степені чистоти поверхні оптичного скла використовується метод, який базується на визначенні крайового кута змочування. Крайовий кут змочування визначається методом лежачої краплини. Даний метод відноситься до статичних методів визначення поверхневого натягнення, тобто в момент вимірювання поверхня нерухома. Метод базується на вимірюванні параметрів профілю краплини, що знаходиться на плоскій поверхні тіла. Для цього краплину необхідно сфотографувати і за допомогою спеціального програмного забезпечення визначити необхідні параметри для розрахунку крайового кута змочування [141,142].

*Фінішне сушіння ІЧ-нагрівом.* Якість очищення поверхні оптичних деталей контролюється під мікроскопом у відбитому і пропущеному світлі, а також за методикою змочування поверхні, описаною в [13] і має добре змочуватися водою (абсолютно гідрофільна поверхня).

Якщо якість очищення поверхні оптичного скла, після проведення контролю, задовольняє поставленим вимогам то переходять до наступного етапу технологічного процесу, в протилежному випадку здійснюють ще один повний цикл очищення.

Перед завантаженням оптичних заготовок, підложкотримачі також проходять хіміко-механічне очищення від забруднень протягом 5...10 хвилин. Для скорочення часу підготовчої стадії, очищення підложкотримачів здійснюють заздалегідь.

Далі, підкладинки розміщуються у вакуумній камері, в якій створюється вакуум  $P_{\text{зал.}} = 6,6 \cdot 10^{-3}$  Па (час між очищенням та розміщенням у вакуумній камері має бути якомога меншим і не перевищувати 15 хв), і їх поступово починають нагрівати до температури 300...400 °С і витримують за цієї температури

протягом 30 хв. В процесі нагрівання у вакуумі скла шкідливі включення з його поверхні десорбують у вакуум.

*Підготовка до оброблення скла у вакуумі.*

Підготовча стадія складається з таких основних частин:

- закріплення та базування скляних заготовок в затискному пристрої підковпачної арматури;
- герметизація вакуумної камери та отримання в ній необхідного значення технологічного тиску.

Відповідно до технологічного циклу та в залежності від форми та геометричних розмірів заготовок завантажується різна кількість оптичних заготовок (від 11 до 22 штук). Заготовки розташовуються на затискному устаткуванні, яке закріплене в пристрої обертового переміщення заготовок.

Після очищення виробів у вакуумі розпочинається основний технологічний цикл: попередній нагрів (за допомогою терморегулятора РИФ-101, в автоматичному режимі згідно заданого температурного профілю здійснюється температурна підготовка поверхні до ЕПО), ЕПО, охолодження поверхні оптичного скла до температури при якій відбувається процес отримання тонких покриттів, нанесення тонких покриттів, ЕПО, охолодження.

Послідовне виконання усіх етапів технологічного циклу з додержанням основних робочих параметрів повинно забезпечити достатню якість деталей після їх виготовлення.

Після завершення циклу попереднього нагріву, проводиться оброблення поверхні оптичного скла низькоенергетичним електронним потоком стрічкової форми (режими оброблення вибираються в залежності від типу оптичного скла, його геометричних розмірів та вимог, щодо якості поверхні). Охолодження зразків після електронно-променевого оброблення проводиться протягом двох годин. Температура поверхні знижується до необхідної (в залежності від типу матеріалу, що напильюється). Далі відбувається процес нанесення тонких плівок, який включає в себе етап попереднього розігріву випарника, знегажування навіски матеріалу, що випаровується і доведення його до

плавлення. Після отримання тонких покриттів здійснюється процес модифікації поверхні тонкої плівки електронним потоком.

Слід зауважити, що особливістю комбінованої технології є те, що оброблення проводиться в одному технологічному циклі за незмінних умов робочого середовища (вакуум  $p = 5 \cdot 10^{-4}$  Па), що виключає можливість утворення нових хімічних, небажаних, сполук тонкої плівки з елементами навколишнього середовища на проміжному етапі формування структури покриття.

Після завершення процесу оброблення та подальшого охолодження виробів необхідно здійснити напуск повітря у вакуумну камеру, підняти ковпак вакуумної камери та розвантажити оптичні вироби із камери.

Наступним етапом є перевірка якісних характеристик отриманих оптичних елементів.

#### 2.2.2. Оцінки якості поверхні оптичних деталей методом атомно-силової мікроскопії

Високі експлуатаційні властивості ОЕ сучасних оптичних систем в більшості випадків залежать від якості оптичних поверхонь та їх стійкості до впливів зовнішніх факторів в процесі експлуатації. Як правило, для оцінювання якості поверхні оптичних виробів застосовують два критерії [143]: шорсткість і чистота поверхні. За рядом робіт, наприклад [144, 145], встановлено, що для дослідження морфології та локальних властивостей поверхні з високою просторовою роздільною здатністю перспективним є метод атомно-силової мікроскопії (АСМ), за допомогою якого можна дослідити рельєф поверхні та розрахувати його статистичні характеристики.

Розроблювана в розділі методика оцінки якості поверхні оптичних деталей методом атомно-силової мікроскопії дозволяє проводити неруйнівний контроль якості поверхні оптичного скла до і після ЕПО та досліджувати поверхню тонкої плівки, осадженої на такій поверхні.

В якості основної дослідної бази нанорельєфу поверхні оптичних виробів використовувався удосконалений за участі автора дисертації вимірювальний комплекс на базі атомно-силового мікроскопу "NT-206V" ("Микротестмашины", Білорусь). Для проведення вимірювань використовувалися кремнієві конічні зонди марки CSC-38 ("Micromash", Німеччина) з радіусом вістря 10 нм. Зонди цього типу мають широке застосування і придатні, як для діагностики нанорельєфу так і для дослідження механічних властивостей твердих поверхонь [144]. Даний тип зонду, в порівнянні з іншими типами зондів, має наступні переваги: висока чутливість до невеликих перепадів рельєфу поверхні, має широкий діапазон вимірюваних параметрів, відноситься до бюджетного класу зондів [144]. Для візуалізації об'єкта, що досліджується (на підготовчих стадіях та в процесі сканування) використовується оптична камера з довгим фокусом ("Logitech", США), яка дозволяє отримати збільшення досліджуваної ділянки до 100 разів і має поле огляду  $1 \times 0,75 \text{ мм}^2$  [144]. На рисунку 2.2 представлено загальний вигляд вимірювального комплексу на базі атомно-силового мікроскопу «NT-206», а також функціональна схема проведення досліджень поверхонь оптичних виробів за його допомогою.

В основі методики оцінки якості поверхні оптичних деталей знаходиться послідовність проведення вимірювальних досліджень методом атомно-силової мікроскопії, що наведена в роботі [144].

За цією методикою, спочатку зразок для проведення досліджень розміщують на предметному столику (підкладинці) АСМ (максимальні розміри зразка не повинні перевищувати діаметр 30 мм, висоту 8 мм). Для отримання достовірних результатів вимірювання поверхня зразка, що досліджується має бути розташована паралельно основі предметного столика, в горизонтальній площині, плоскою стороною до зонду.

В процесі сканування було використано контактний (статичний) режим дослідження, який має меншу точність ніж динамічний режим, проте, в нормальних умовах проведення дослідження (вологість порядку 40...60%),

останній не враховує вологу та органічні мікрозалишки, що адсорбуються поверхнею досліджуваного виробу, чим спотворюють профіль поверхні артефактами [144].



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд вимірювального комплексу для визначення нанорельєфу поверхні на базі атомно-силового мікроскопу

Після закінчення роботи АСМ здійснюється оброблення результатів сканування поверхонь за допомогою програми SurfaceViewer v.6.2, яка має такі види сервісу: трьохвимірна візуалізація поверхні; профілювання поверхні в необхідному перетині; визначення розподілу висот поверхні; кутова гістограма; та інші, рисунок 2.3 [144].

При кількісному оцінюванні шорсткості поверхні використовувався принцип «середньої лінії», яка розділяє профіль поверхні таким чином, що площі фігур з обох боків від лінії однакові. В якості основних параметрів для оцінки неоднорідності оптичної поверхні також використовуються [146]: максимальна висота профіля  $P_z$  (сума найбільшої висоти піку профілю і найбільшої глибини профілю в межах базової довжини); середньоарифметичне та середньоквадратичне відхилення профілю  $R_a$ ,  $R_q$  (служать для визначення середньоарифметичного та середньоквадратичного значень висот профіля в межах базової довжини).

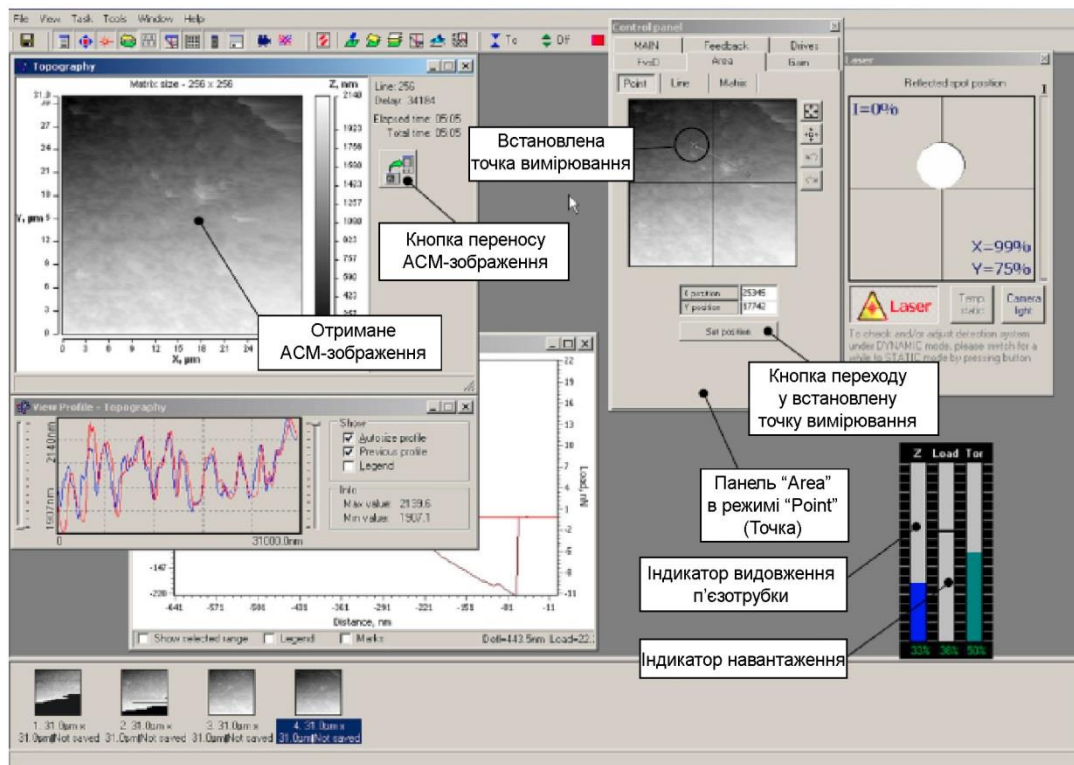


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд інтерфейсу програми дослідження результатів сканування поверхні методом АСМ

В цілому, вимірювання нанорельєфу поверхонь із застосуванням методу атомно-силової мікроскопії здійснюється у послідовності представлений у вигляді блок-схеми, рисунок 2.4 [144].

Метод АСМ окрім дослідження морфології поверхні дозволяє проводити вимірювання механічних характеристик поверхонь оптичного скла та тонких покриттів на них [144].

Таким чином, в розділі наведена методика оцінки якості поверхні оптичних деталей методом атомно-силової мікроскопії, що дозволяє оперативно проводити неруйнівний контроль якості поверхні оптичного скла до і після ЕПО (наявність мікро- та нанодефектів, мікрошорсткість, механічну міцність) та досліджувати поверхню тонкої плівки, осадженої на такій поверхні (залишкова мікрошорсткість, адгезійна міцність, зносостійкість) в одному вимірювальному циклі, що на відміну від аналогічних методів вимірювання гарантує високу точність позиціонування вимірювального інструменту на ділянці досліджуваної поверхні, а також дозволяє коригувати значення



геометричних та фізичних параметрів, що пов'язано із зношенням робочого інструменту (зонду) в процесі вимірювання.

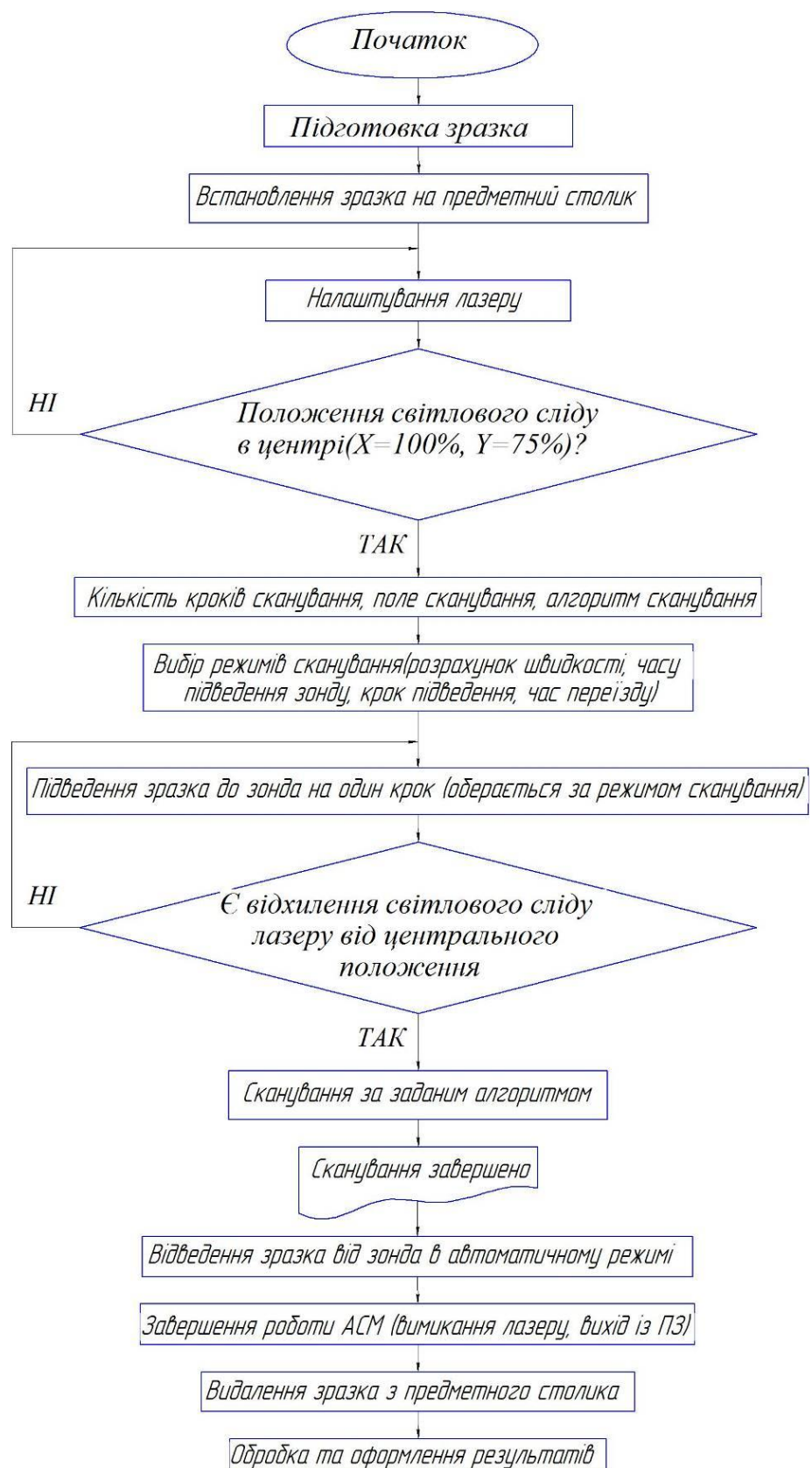


Рисунок 2.4 – Блок-схема проведення дослідження нанорельєфу за допомогою АСМ

## 2.3. Технічне забезпечення експериментальних досліджень

### 2.3.1. Умови проведення технологічного експерименту

Проведення технологічного експерименту здійснювалось в лабораторії «Вакуумної техніки та електронно-променевих методів обробки» Черкаського державного технологічного університету. Для отримання якісних оптичних елементів (ОЕ) для різноманітних галузей науки і техніки необхідно дотримуватися технологічного мікроклімату та чистоти технологічних середовищ. Неможливо створити ОЕ з гарантованою якістю, надійністю та високою продуктивністю, якщо хоча б один параметр чистоти технологічного процесу виробництва перевищив межі допустимих значень [147].

Приміщення для проведення експерименту відноситься до чистого виробничого приміщення і повинно відповідати другому класу чистоти повітря згідно ОСТ1.41519-80 (відносна вологість –  $50\pm 7\%$ , температура повітря в діапазоні 18-24 °С, максимальна швидкість руху повітря 0,2 м/с) і має містити: джерело трифазної мережі 380/220 В частотою 50 Гц; контур заземлення з опором до 4 Ом; магістраль для відведення парів форвакуумного насосу; приточно-витяжну вентиляцію з пиловловлювальним фільтром [148].

При дослідженні методом атомно-силової мікроскопії, додатково вимагаються наступні умови оточуючого середовища [144]: температура  $(20\pm 3)$  °С; відносна вологість повітря не більше 80%; атмосферний тиск  $(100\pm 4)$  кПа; напруга мережі живлення 220 В; частота мережі живлення 50 Гц.

### 2.3.2. Критерії, що висуваються до технічного забезпечення експериментальних досліджень

Технологічне обладнання, яке використовується для здійснення комбінованого процесу оброблення оптичних матеріалів має відповідати наступним вимогам:

1. Забезпечувати стабільність встановлених технологічних режимів ЕПО та нанесення покриттів в кожному технологічному циклі.
2. Забезпечувати можливість контролю та керування технологічними параметрами при комбінованіому обробленні.
3. Забезпечувати високу продуктивність, при обробленні оптичних виробів не менше: 11 штук прямокутної форми (розмірами 40×65×1,5 мм, 50×40×20 мм), 22 штуки, квадратної форми (розмірами 20×20×1,0 мм), круглої форми (діаметром 44 мм товщиною 2, 4, 6 мм), або 22 штуки круглої форми (діаметром 30 товщиною 2, 4, 6 мм) за один цикл.
4. Вакуумна система установки має забезпечувати граничний вакуум в діапазоні  $1 \cdot 10^{-6}$  -  $1 \cdot 10^{-7}$  мм рт.ст. та робочий вакуум  $1 \cdot 10^{-5}$  -  $1 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст. на протязі усього процесу оброблення. Час виходу на режим до високого вакууму протягом 50 хв.
5. Система нагріву повинна забезпечувати нагрівання підкладинок до температури 1100 К.
6. Безвідмовність роботи на протязі усього вакуумного циклу.
7. Система регулювання і вимірювання температури підкладинок повинна забезпечувати цифрову індикацію заданої і фактичної температури нагріву з точністю  $\pm 3$  °К, автоматична підтримка температури з відхиленням не більше  $\pm 3$  °К від встановленого заданого значення при термостабілізації підкладинок, електронно-променевого оброблення і напиленні. Діапазон вимірювання від 0 до 1100 К.
8. Забезпечувати нерівномірність по товщині тонкої плівки  $\pm 5\%$
9. Економічність, надійність та зручність в експлуатації, якісну обробку з високою повторюваністю, дотримання екологічної чистоти виробництва та безпечних умов праці обслуговуючого персоналу.

До основних метрологічних показників ЕПО відносяться:

- енергетичні характеристики потоку електронів в зоні його впливу на поверхню деталі (енергія  $E$ , еВ, потужність  $P_{\text{пит}}$ , Вт/см<sup>2</sup>, густина струму потоку  $j$ , мА/см<sup>2</sup> по перерізу пучка електронів);

- геометричні характеристики потоку електронів в зоні його впливу на поверхню деталі (ширина електронного потоку  $b$ , мм; функція нормального розподілення густини електронного потоку по перерізу потоку електронів).

### 2.3.3. Удосконалення базового вакуумного обладнання для проведення технологічного експерименту

Для реалізації комбінованого методу та відпрацювання технології виготовлення ОЕ в єдиному технологічному циклі було проведено удосконалення промислової вакуумної установки УВН-71-П, у частині встановлення нового та модифікування в установці таких основних вузлів і блоків:

- нової печі інфрачервоного нагріву та розробленого за безпосередньої участі автора блоку її керування для здійснення програмованих циклів нагріву та охолодження деталей;
- удосконаленої електронно-променевої гармати Пірса для формування низькоенергетичного потоку електронів стрічкової форми з розробленою автором системою гнучкого керування режимами електронного потоку;
- нового контрольно-вимірювального вузла, що містить пристрій для зондування електронного потоку, приладів для контролю технологічних параметрів обладнання, тощо.

Зовнішній вигляд та структурна схема удосконаленого технологічного обладнання для КЕПО представлені на рисунку 2.5. Конструкція даної установки дозволяє в єдиному технологічному циклі здійснювати стрічкове ЕПО оптичного скла, резистивним методом отримувати тонкі плівки та проводити їх поверхневу модифікацію ЕПО.

Основні технічні характеристики модифікованої електронно-променевої установки наведені в Додатку Б.



Рисунок 2.5 –Зовнішній вигляд установки УВН-71-П для комбінованого електронно-променевого оброблення:

1 – вакуумна камера; 2 – блок живлення електронного випарника УЭЛИ-1; 3 – блок живлення резистивного випарника; 4 – блок живлення електронно-променевої гармати Пірса “Statron”; 5 – терморегулятор-термозадатчик РИФ-101; 6 – вакуумний пост установки УВН-71 П; 7 – блок живлення та керування електроприводом механізму переміщення; 8 – пристрій зондування електронного потоку; 9 – ПЕОМ для контролю та керування технологічними параметрами електронно-променевого оброблення

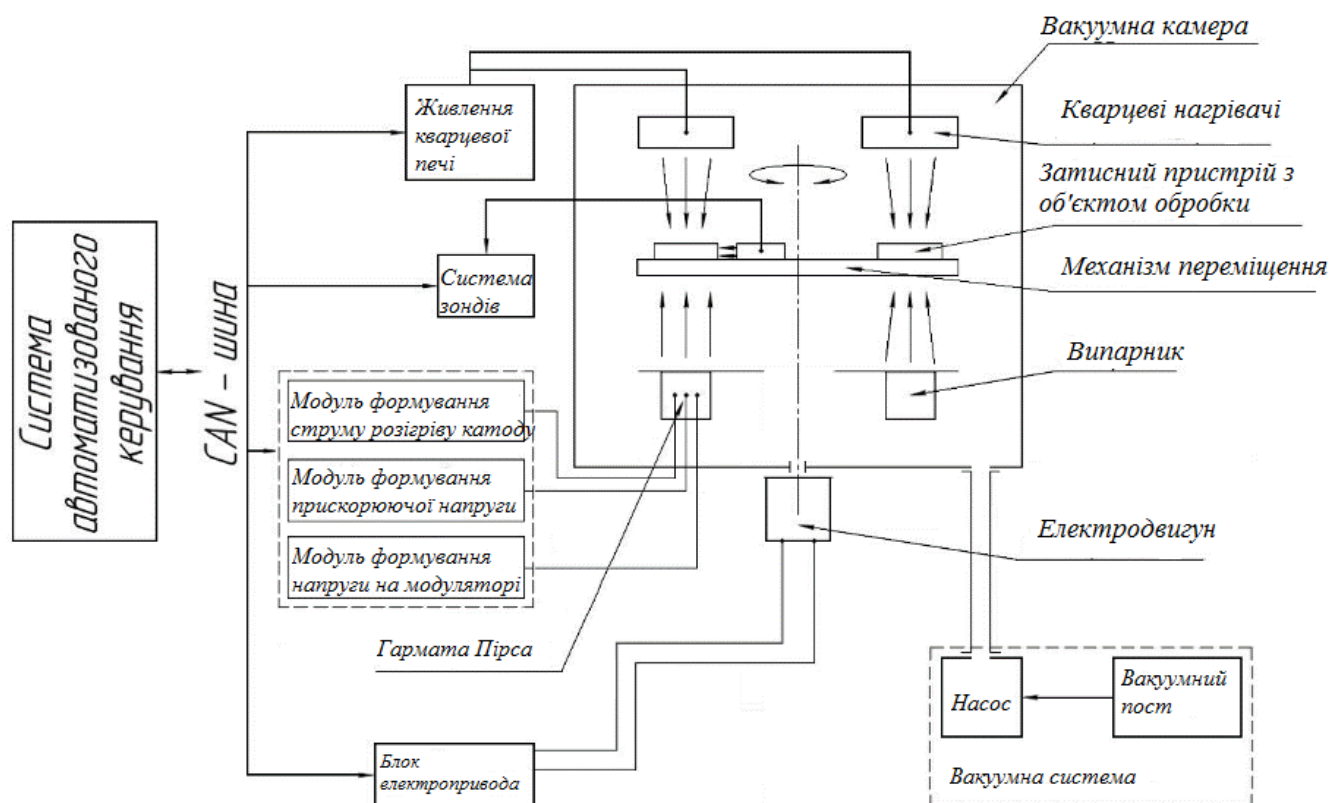
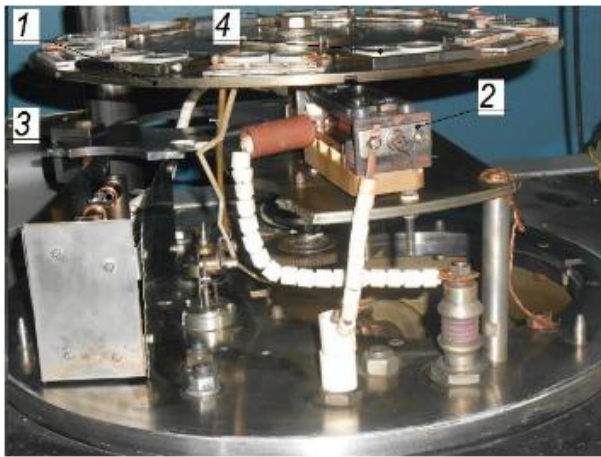
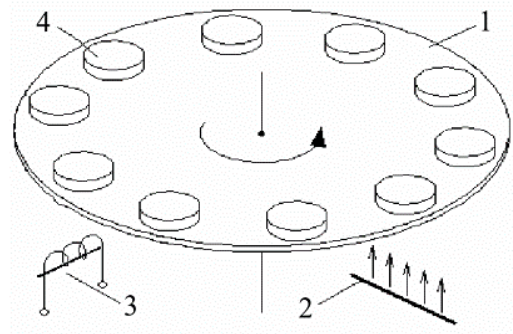


Рисунок 2.6 – Структурна схема модифікованої електронної установки

*Технологічне оснащення вакуумної камери.* Вакуумна камера установки оснащена системою обертowego переміщення заготовок, яка складається з диску на якому розміщують оптичні деталі, що закріплені на спеціальних тримачах підкладинок. Нагрів підкладинок забезпечується кварцовими галогенними лампами. Загальний вигляд технологічного оснащення вакуумної камери наведено на рисунку 2.7. Пристрій складається з утримувача підкладинок 1 з вертикальною віссю обертання, ЕПГ Пірса 2, для генерації стрічкового низькоенергетичного електронного потоку (до 6 кеВ) і випарника 3, призначеного для нанесення тонких плівок на поверхню оптичних заготовок 4. Швидкість руху обертowego пристрою встановлюється в залежності від умов технологічного циклу. Така схема оброблення дає можливість проводити багаторазову обробку поверхні електронним потоком і напилювати тонкі плівки в одному технологічному циклі.



а



б

Рисунок 2.7 – Загальний вигляд (а) та структурна схема (б) [149, 150] технологічного оснащення експериментальної установки для комбінованого оброблення поверхні: 1 – утримувач підкладинок; 2 – електронно-променева гармата Пірса; 3 – резистивний випарник; 4 – оптична заготовка

*Електронно-променева гармата Пірса.* В дисертаційній роботі в якості інструменту оброблення було використано ЕПГ Пірса, яка генерує параксіальний низькоенергетичний потік електронів стрічкової форми. ЕПГ Пірса має надійну та просту конструкцію, а також дозволяє забезпечити рівномірний розподіл енергії динамічного електронного потоку по площині оброблюваного матеріалу.

Зовнішній вигляд та модель розробленого автором варіанту ЕПГ Пірса представлено на рисунку 2.8. Дана ЕПГ Пірса має наступні експлуатаційні характеристики: прискорююча напруга 0...6 кВ, напруга на модуляторі 0...65 В, струм розжарення катоду 0...30 А, струм ЕП 50...400 мА.

Анодні пластини (1) розташовані вздовж катоду і дають змогу регулювати ширину анодної щілини в межах 0,5...3,5 мм. Анод працює, як розсіювальна лінза і тому на виході відбувається розходження електронного потоку під кутом  $\gamma_a$

Також автором удосконалено функціональну схему регулювання параметрами ЕПГ Пірса, рисунок 2.9.



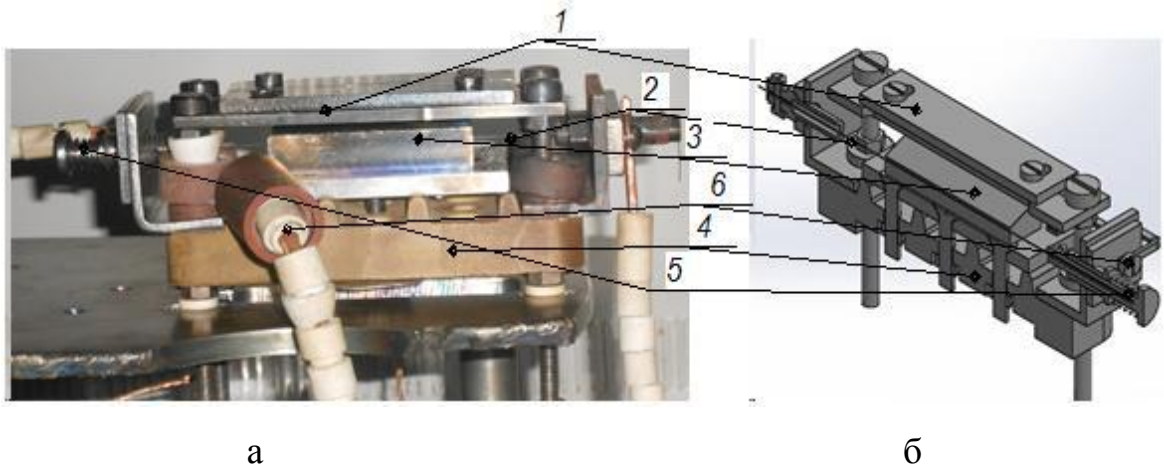


Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд (а) та модельне зображення (б) ЕПГ Пірса, що використовується в дисертаційному дослідженні: 1 – анодні пластини; 2 – катод; 3 – модулятор; 4 – керамічна основа; 5 – катодотримач; 6 – струмовідвід

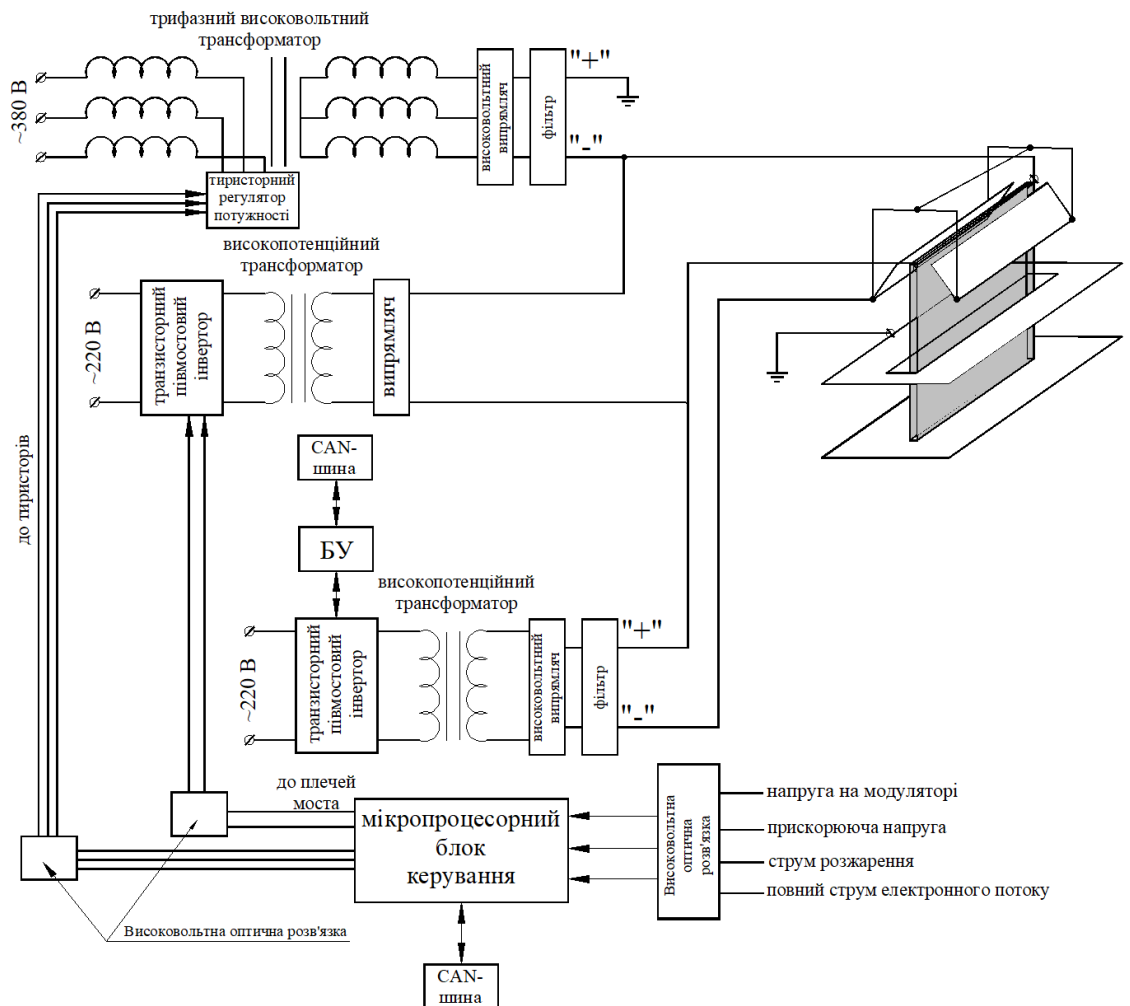


Рисунок 2.9 – Удосконалена функціональна схема регулювання параметрами ЕПГ Пірса



*Кварцові нагрівачі.* Розроблені автором для поступового нагріву та охолодження оптичних виробів в процесі комбінованого оброблення, рисунок 2.10. Система нагріву складається з чотирьох рефlectorів виготовлених зі сталі 12ХН10Т які мають параболічну форму. Для підвищення ККД теплової печі відбиваюча частина рефlectorів укомплектована автором дисертаційного дослідження пластинами з покриттям нітрид бору. Загальна потужність системи складає 4000 Вт. Для автоматичного регулювання температури використовується терморегулятор „РИФ-101. В якості температурного датчика використано хромель-алюмелієву термопару.

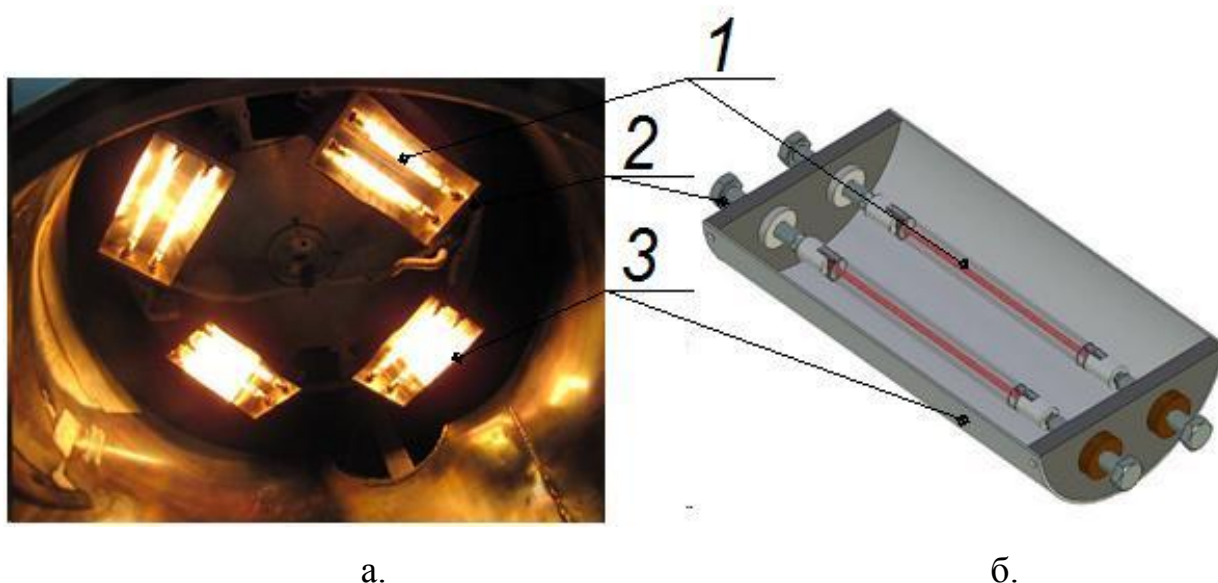


Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд (а) теплової печі нагріву (охолодження) оптичних матеріалів та модельне зображення окремого її нагрівача (б): 1 – кварцова лампа; 2 – струмовідводи; 3 – рефlector

Використання даної системи нагріву дозволяє здійснювати рівномірний нагрів, як одночасно усіх оптичних зразків.

#### 2.3.4. Контрольно-вимірювальне обладнання технологічного процесу

*Система зондування електронного потоку.* Система зондування призначена для визначення розподілу енергії електронного потоку та

коригування режимів оброблення оптичних виробів [152-155]. Основні завдання, що вирішуються такою системою:

- вимірювання густини розподілу енергії в поперечному перерізі електронного потоку з питомою потужністю  $10^2 \dots 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>;
- визначення ефективної ширини стрічкового електронного потоку;
- визначення факторів, які впливають на розподілення енергії по поперечному перерізу електронного потоку;
- дослідження параметрів електронного потоку в процесі ЕПО;
- представлення результатів зондування, які отримуються відразу в цифровому вигляді безпосередньо для стабілізації та керування електронним потоком.

Схема автоматизованої системи вимірювання та оброблення зондових характеристик представлена на рисунку 2.12.

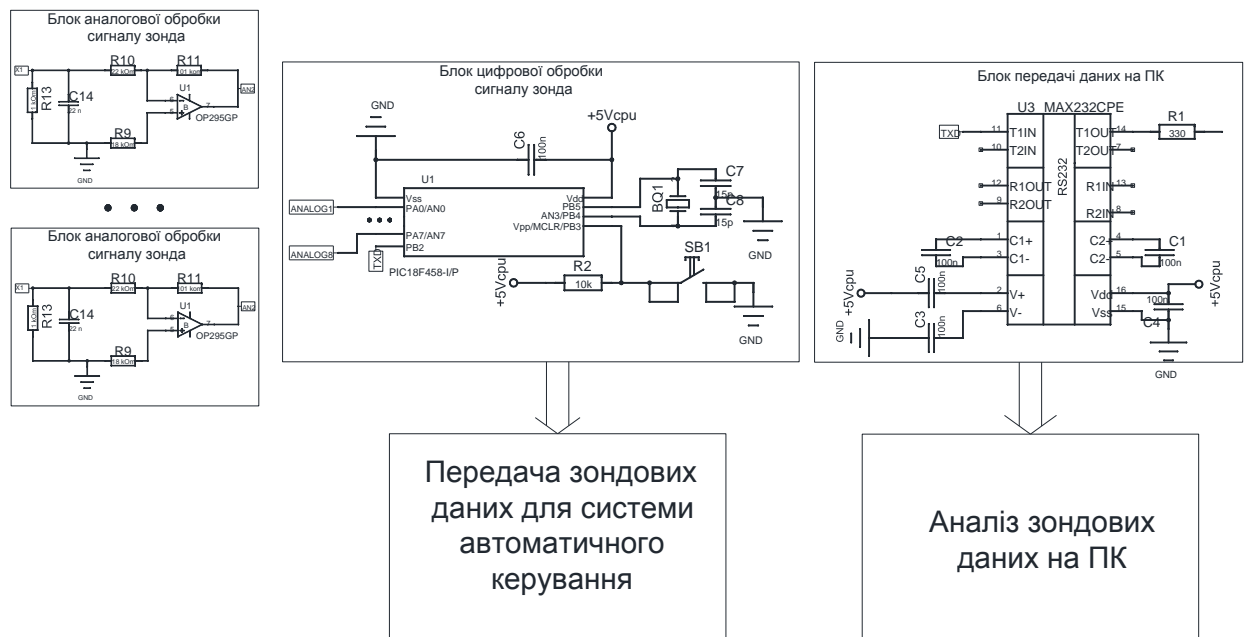
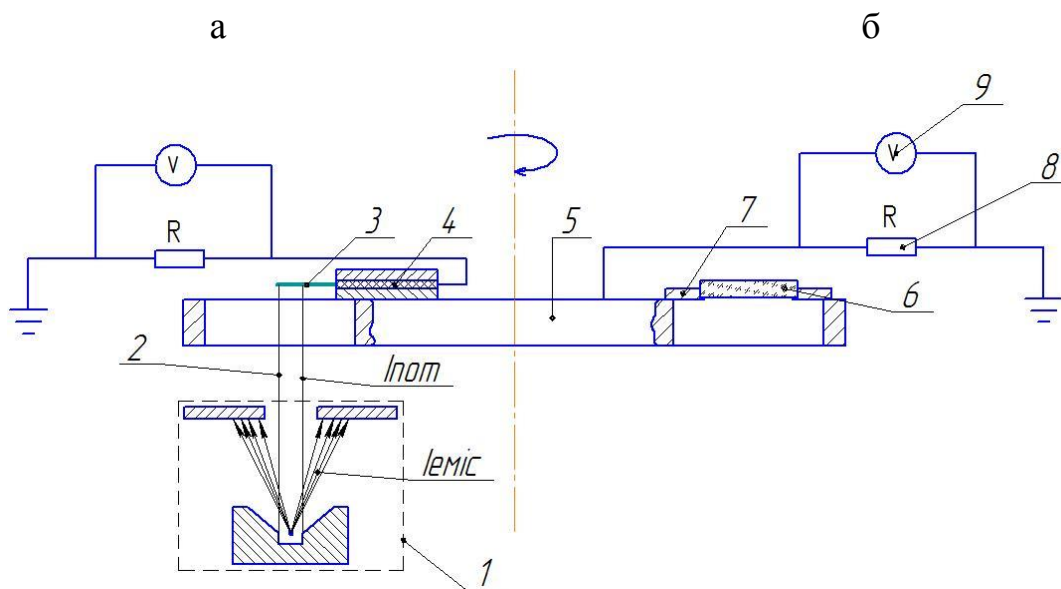
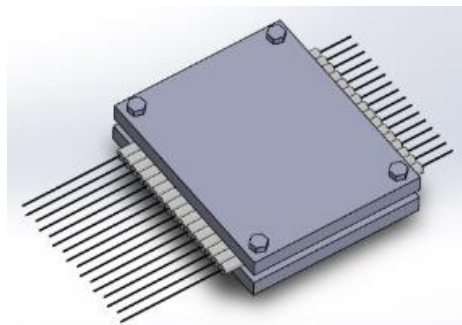


Рисунок 2.11 – Структурна електрична схема мікропроцесорного блоку оброблення зондових характеристик



В

Рисунок 2.12 – Зовнішній вигляд (а), модель вимірювального блоку системи зондування електронного потоку (б) та схема зондування електронного потоку стрічкової форми (в): 1 – модуль електронної гармати Пірса, 2 – стрічковий електронний потік, 3 – вольфрамові зонди, 4 – керамічний ізолятор, 5 – обертовий пристрій для переміщення виробів; 6 – оптичний виріб; 7 – утримувач підкладинок; 8 – шунтуючий резистор опором 1 Ом; 9 – вольтметр.

Таким чином, проведено удосконалення вакуумного технологічного обладнання в частині спеціального технологічного оснащення та вузлів, що дає можливість здійснювати комбіноване поверхневе електронно-променеве оброблення для отримання оптичних елементів з високими якісними характеристиками. Також розроблена система оперативного діагностування, що дозволяє визначати та коригувати робочі параметри режимів стрічкового електронного потоку безпосередньо в процесі ЕПО.

## 2.4 Визначення форми, розмірів та розподілу густини струму зондуванням стрічкового електронного потоку

Для вимірювання розподілу енергії в електронному потоці використовується мікропроцесорний пристрій, який описаний в розділі 2.3.4. Зонди розташовані паралельно один одному. Для зменшення впливу на результати вимірювань явища вторинно-електронної емісії, відбиття електронів, для усунення завад електромагнітних хвиль, зонди розташовано попарно зі зміщенням в напрямку руху зондів. В якості матеріалу для виготовлення зондів використано вольфрамовий дріт марки ВР-20 діаметром 0,4 мм, який має високе значення роботи виходу електронів, що також дозволяє мінімізувати явище вторинної електронної емісії.

Після включення обертового пристрою, спочатку під електронним потоком опиняється система зондування, а потім оброблювані вироби. Зондовий струм з кожного зонду через мідний дріт та вакуумний електричний ввід фіксується автоматизованою системою, яка розташована поза вакуумною камерою. Сигнал, який отримує кожен з зондів, змінюється в результаті проходження електронного потоку і є результатом інтегрування розподілу струму по його перерізу. Для здійснення передачі даних до зовнішніх пристроїв використано інтерфейси RS-232 та CAN. Струм, який фіксується системою зондування поступає на перетворювач «струм-напруга», який базується на прецизійних підсилювачах ОР-295 [156].

За допомогою керуючого мікроконтролера здійснюється оброблення отриманих даних (обчислюється різниця зондових характеристик між парними зондами; аналого-цифрове перетворення отриманих результатів в силу струму; перерахунок отриманих струмів на площу поперечного перерізу зондів; диференціація характеристик з окремих зондів), які використовуються для керування електронною гарматою шляхом коригування робочих параметрів режиму ЕПО, для чого останні формуються мікроконтролером у пакети даних і передаються на ПК через інтерфейс RS-232 та до системи керування через

інтерфейс CAN. Зондовий струм, який використовується для визначення розподілу густини струму по перерізу електронного потоку, за допомогою автоматичного цифрового пристрою переводиться у цифровий вигляд та оброблюється мікропроцесором, який здійснює числове диференціювання зондової характеристики за формулою [110:]

$$j(x) = (I_z(x) - I_z(x - \Delta x)) \cdot d_z \cdot V_e \cdot t_{вим}, \quad (2.1)$$

де  $j(x)$  – густина струму в даній точці з координатою  $x$ ;  $I_z(x)$  – зондовий струм в даній точці;  $I_z(x - \Delta x)$  – зондовий струм при попередньому вимірюванні;  $d_z$  – діаметр зонду;  $V_e$  – швидкість руху блоку з зондами;  $t_{вим}$  – період між вимірюваннями аналого-цифрового перетворювача.

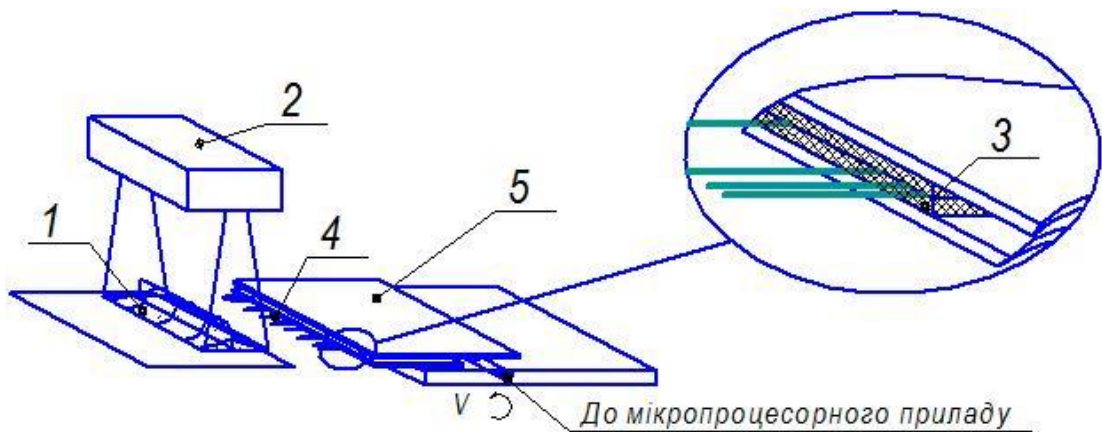


Рисунок 2.13 – Схема зондування низько енергетичного електронного потоку стрічкової форми: 1 – стрічковий електронний потік, 2 – ЕПГ Пірса, 3 – керамічний ізолятор, 4 – вольфрамові зонди, 5 – зондовий модуль

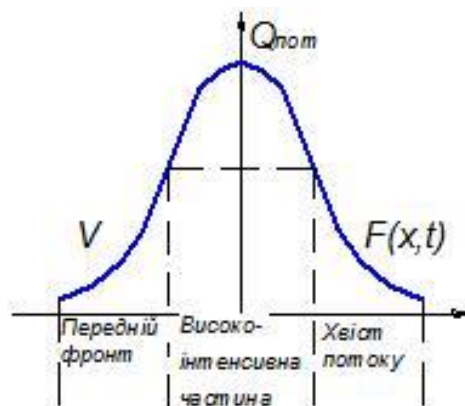


Рисунок 2.14 – Схема просторово-енергетичного розподілення стрічкового електронного потоку за перерізом:  $Q_{пот}$  – енергія потоку;

$F(x, t)$  – потужність потоку

## 2.5 Висновки до розділу

В розділі проведено удосконалення існуючого та розроблення нового методичного та технічного забезпечення технологічного експерименту.

1. В роботі запропоновано методичний комплекс для проведення експериментальних досліджень та подальшого дослідження їх результатів. В даний комплекс включені наступні авторські методики: модифікування поверхонь оптичних елементів з використанням комбінованої електронно-променевої технології, визначення та контроль стрічкового електронного потоку, оцінки якості поверхні оптичних виробів методом АСМ.

2. Представлено удосконалене технологічне вакуумне обладнання для комбінованого електронно-променевого оброблення (поєднання в одному технологічному циклі ЕПО та резистивного осадження тонких плівок) в частині впровадження схеми регулювання параметрами гармати Пірса, що дозволяє в режимі реального часу проводити гнучке управління процесом ЕПО шляхом зміни вихідних параметрів оброблення.

3. Розроблена система оперативного діагностування та визначення робочих параметрів стрічкового електронного потоку. Дана система дозволяє оперативно та високоточно визначати просторово-енергетичні характеристики параметрів стрічкового електронного потоку безпосередньо в процесі електронно-променевого оброблення.

### **РОЗДІЛ 3.**

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРИ КОМБІНОВАНОМУ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОМУ ОБРОБЛЕННІ**

В даному розділі розглядається низькоенергетична електронно-променева гармата Пірса, яка використовується для оброблення оптичних елементів [158-161]. Представлено результати розрахунку електростатичного поля та траєкторії руху електронів з урахуванням об'ємного заряду та початкової швидкості. Проведено дослідження з визначення впливу потенціалу модулятора на форму електронного потоку. Для підвищення якісних характеристик оптичних елементів та підвищення повторюваності отримуваних результатів проводиться розв'язок задачі теплопровідності, з метою якнайкращого наближення до рівномірного розподілу температури на поверхні оптичного елемента при ЕПО. Проводиться експериментальне дослідження з визначення вольт-амперних характеристик та з визначення форми, розмірів та розподілу густини струму низькоенергетичного стрічкового електронного потоку [162, 163].

#### **3.1. Моделювання низькоенергетичної електронно-променевої гармати Пірса**

Для розв'язку задач з метою формування електронних потоків використовують два основних методи: метод синтезу та метод аналізу. Метод аналізу полягає в послідовній зміні геометрії електродів електронно-променевої гармати до тих пір поки параметри електронного потоку не будуть відповідати заданим. Даний метод дає змогу визначити початкову конфігурацію електронної гармати та траєкторію руху електронів, за допомогою якого визначають параметри електронного потоку. Метод синтезу базується на використанні відомих залежностей, які описують рух електронних пучків в декартовій, циліндричній або сферичній системах. Однак цей метод має певні обмеження, які пов'язані з необхідністю введення спрощуючих припущень,

також виникають складності при розрахунках які пов'язані, як з геометрією електродів так і конфігурацією магнітних полів [161].

Теоретичні методи дослідження електронних потоків поділяють на аналітичні та чисельні. Аналітичні методи не завжди дають змогу визначити розподілення полів в електронно-оптичних системах. Тому в більшості випадків використовують чисельні методи для визначення та аналізу траєкторії руху електронів. Серед найбільш розповсюджених чисельних методів, які застосовуються для розрахунку електростатичних полів та траєкторії руху електронів є наступні методи: кінцевих різниць, кінцевих елементів, інтегральний метод. Особливістю чисельних методів розв'язку диференціальних рівнянь є високий порядок формул для апроксимації, що дозволяє збільшувати крок інтегрування, зменшити похибку розрахунку та скоротити час на проведення розрахунку. Серед цих методів найбільшого використання має метод кінцевих елементів, який має наступні переваги: простота встановлення граничних умов, розгляд складних електродних конфігурацій, можливістю довільно змінювати, як форму елементів так і їх густину, підводячи їх краї до меж і збільшуючи точність на критичних ділянках [161].

В якості інструмента оброблення використано ЕПГ Пірса, яка використовується для генерації потоку електронів стрічкової форми. Даний тип гармати знайшов широке використання, як інструмент при термічних методах оброблення, завдяки простій конструкції електродів, можливості фокусування електронних пучків з високим первеансом та простоті і точності розрахунку. Гармати Пірса, які генерують низькоенергетичний потік електронів стрічкової форми, застосовуються для поверхневої модифікації оптичних матеріалів та для створення оптичних мікроелементів. Необхідною умовою для підвищення якісних характеристик оптичних елементів є підвищення керованості інструменту оброблення. Тому важливо провести дослідження для встановлення залежностей між вихідними параметрами ЕПГ Пірса



(прискорюючої напруги, струму розжарення та напруги на модуляторі) та просторово-енергетичними параметрами електронного потоку [158- 160].

Електронно-променеві гармати Пірса, дають змогу генерувати плоско-паралельні потоки електронів стрічкової форми, для характеристики, яких використовується співвідношення Пірса [118]:

$$U = A \cdot z^{4/3} \quad (3.1)$$

Зв'язок між густиною струму, напругою і відстанню знаходиться з розв'язку рівняння Пуассона з відповідними граничними умовами

$$j = \frac{2.33 \cdot 10^{-6} \cdot U^{3/2}}{z^2} \quad (3.2)$$

де  $z$  – відстань від катода до точки, що розглядається, м;  $j$  – густина струму;

$$A = \frac{U_{np}}{d^{4/3}} \quad (3.3)$$

$U_{np}$  – прискорююча напруга, кВ;  $d$  – відстань від катода до аноду, м.

У зовнішній області до потоку форма електродів ЕПГ Пірса повторює форму еквіпотенціальних поверхонь нульового потенціалу, а форма анода може бути представлена у формі площини перпендикулярної до потоку електронів. В конструкції даної ЕПГ Пірса використовується дротяний вольфрамовий катод діаметром 0,4 мм. [110, 118]. В якості розсіючої лінзи використовується анодний отвір, після аноду електронний потік має форму стрічки з кутом розходження  $\gamma_a \approx \frac{2}{3} \frac{b_{пот}}{d_{кат}}$  [13].

В даній роботі розв'язувалася задача з використанням двовимірної моделі геометрії електродів, оскільки використання тривимірної моделі геометрії електродів значно ускладнює розрахунок задачі руху електронів. Проведення розрахунків на основі двовимірної геометрії дасть змогу врахувати вплив форми модулятора та розташування катода на електронний потік (рисунок 3.1).

Розв'язок даної моделі було поділено на два етапи [159, 160]: розв'язок задачі електростатики для побудови форми електричного поля ЕПГ Пірса; розв'язок задачі руху заряджених частинок у цьому електричному полі.

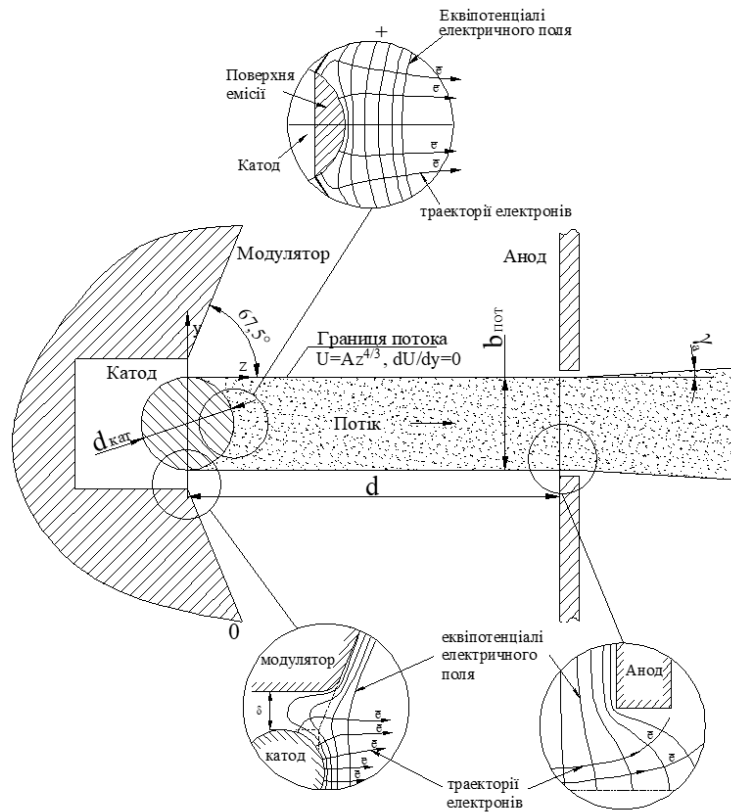


Рисунок 3.1 – Паралельний стрічковий потік електронів. Граничні умови:  
 $d$  – відстань катод-анод;  $b_{\text{пот}}$  – ширина електронного потоку;  $d_{\text{кат}}$  – діаметр катода;  $\gamma_a$  – кут розходження електронного потоку на виході з аноду.

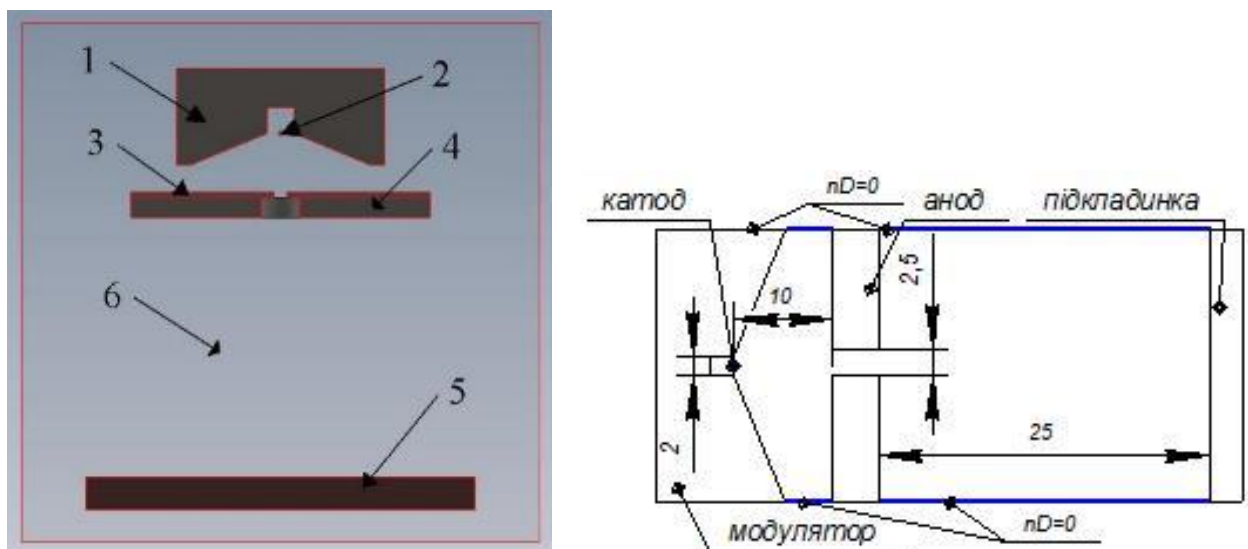


Рисунок 3.2 – Двовимірний модель низькоенергетичної електронної гармати Пірса: 1 – модулятор, 2 – дрітаний вольфрамовий катод, 3 – анодні пластини, 4 – анод, 5 – підкладка, 6 – простір для моделювання траєкторій електронів.

Для проведення розрахунків з визначення електростатичного поля, були встановлені умови однозначності моделі [159- 161]:

Запишемо теорему Гауса для визначення електростатичних полів у вакуумі

$$\nabla \cdot E = \rho / \varepsilon_0, \quad E = -\nabla U; \quad (3.4)$$

Записуємо вираз для збереження заряду (нульовий заряд існує на границі області моделювання тому  $n \cdot D = 0$ ) (рисунок 3.1);

$$E = -\nabla U, \quad \nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r E) = \rho_V; \quad (3.5)$$

густина просторового заряду

$$\nabla \cdot D = \rho_U \quad (3.6)$$

Наступним етапом є встановлення потенціалів електродів (гранична умова  $U = U_0$ ). Прискорююча напруга для катоду становить  $U_{\text{пр}} = 1-6$  кВ, для модулятора  $U_m = 0-65$  В, для анода та підкладинки  $U = 0$  В.

Проведення обчислень траєкторій електронів [159, 160]:

- другий закон Ньютона

$$F = \frac{d(m_e v)}{dt} \quad (3.7)$$

де  $m_e$  – маса електрона, кг,  $v$  – швидкість м/с,  $e$  – заряд електрона;  
 $m_e v$  – імпульс частинки

- сила Лоренца

$$F = eZ(-\nabla U) = eZE \quad (3.8)$$

де  $Z$  – кількість частинок,  $\nabla U$  – градієнт потенціалу електричного поля,  $E$  – напруженість електричного поля.

- кількість частинок в зоні моделювання: заряд  $q = eZ$ , початкова швидкість  $v = v_0$ ;

Опис руху потоків електронів, які рівномірно емітуються з поверхні вольфрамового катоду, має враховувати початкову швидкість електронів з

поверхні катода. До основних проблем відносять неможливість врахування напрямку та швидкості електронів.

- ефект просторового заряду в електронному потоці (поле чинить вплив на частинки, а просторовий заряд впливає на поле). Задача з урахуванням просторового заряду вирішується для полів та частинок одночасно.

$$-\nabla \cdot \epsilon_0 \nabla U = \sum_{i=1}^N eZ \delta(r - q_i) \quad (3.9)$$

$$\frac{d(m_e v)}{dt} = eZ(-\nabla U) \quad (3.10)$$

де  $\delta$  – дельта функція Дірака;

Вплив кожної частинки в моделі на щільність просторового заряду пучка визначається за формулою:

$$\frac{d\rho}{dt} = eZ \sum_{i=1}^N f_{rel} \delta(r - q_i) \quad (3.11)$$

$f_{rel}$  – кількість частинок, які емітуються з поверхні катода за секунду.

Для усунення проблем які пов'язані з невеликою величиною точкового заряду, щільність просторового заряду рівномірно розподіляється по кожному елементу сітки.

Результати розбиття об'єкту моделювання на трикутні елементи представлено рисунку 3.3. Оскільки найбільші значення напруженості електричного поля та найбільша кривизна траєкторії електронів відбуваються в при катодній зоні та в зоні анодної щілини тому найменший розмір елементів обрано саме в цих зонах для підвищення точності розрахунку.

В результаті проведених розрахунків даної моделі було отримане електростатичне поле, яке утворюється в результаті траєкторії електронів під дією електричного поля та сумісної дії потенціалів на електродах гармати і об'ємного заряду електронного потоку. Результати розрахунку електричного поля представлені у вигляді ліній напруженості поля та еквіпотенціальних ліній в прискорюючому проміжку (рисунки 3.4, 3.5).

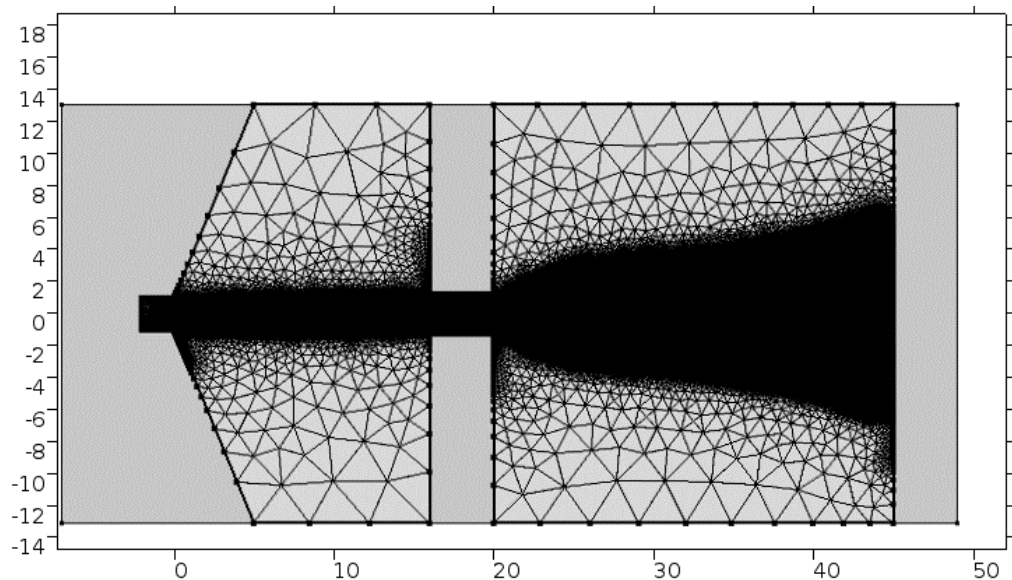


Рисунок 3.3 – Кінцево-елементна сітка для розрахунку

В результаті використання в ЕПГ Пірса катода з круглим перерізом траєкторії електронів у проміжку катод-анод є не паралельні в порівнянні з класичною електронно-оптичною системою. Тому частина електронів потрапляє на поверхню аноду, таким чином енергія яка використовується для розгону електронів витрачається на нагрівання аноду. Тому для підвищення ефективності (відношення струму електронного потоку, що потрапляє на зразок до повного струму електронного потоку), здійснюється керування напругою на модуляторі, яке дасть змогу підвищити ефективність електронного потоку та змінити його форму. Однак збільшення значень напруги на модуляторі призводить до зменшення ефективної площі катода (зменшується площа з якої відбувається емісія електронів) і відповідно не призводить до збільшення струму електронного потоку, який потрапляє на поверхню.

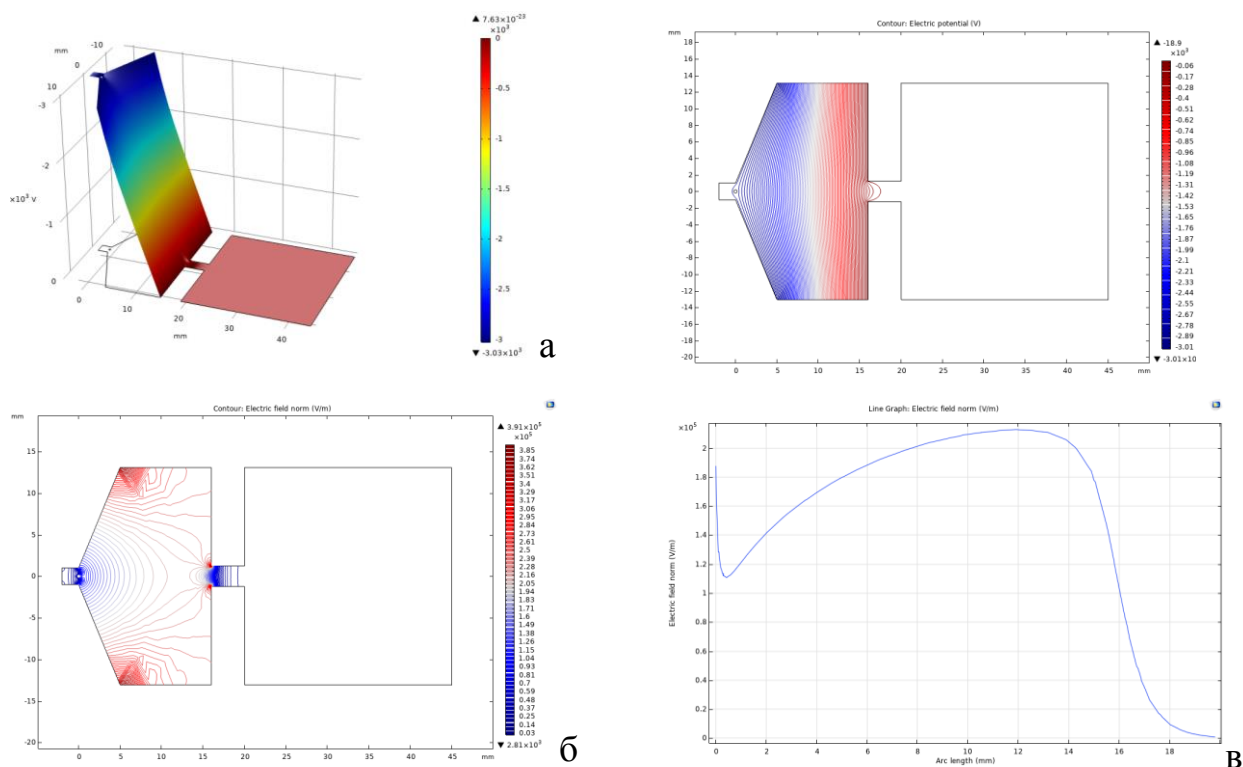
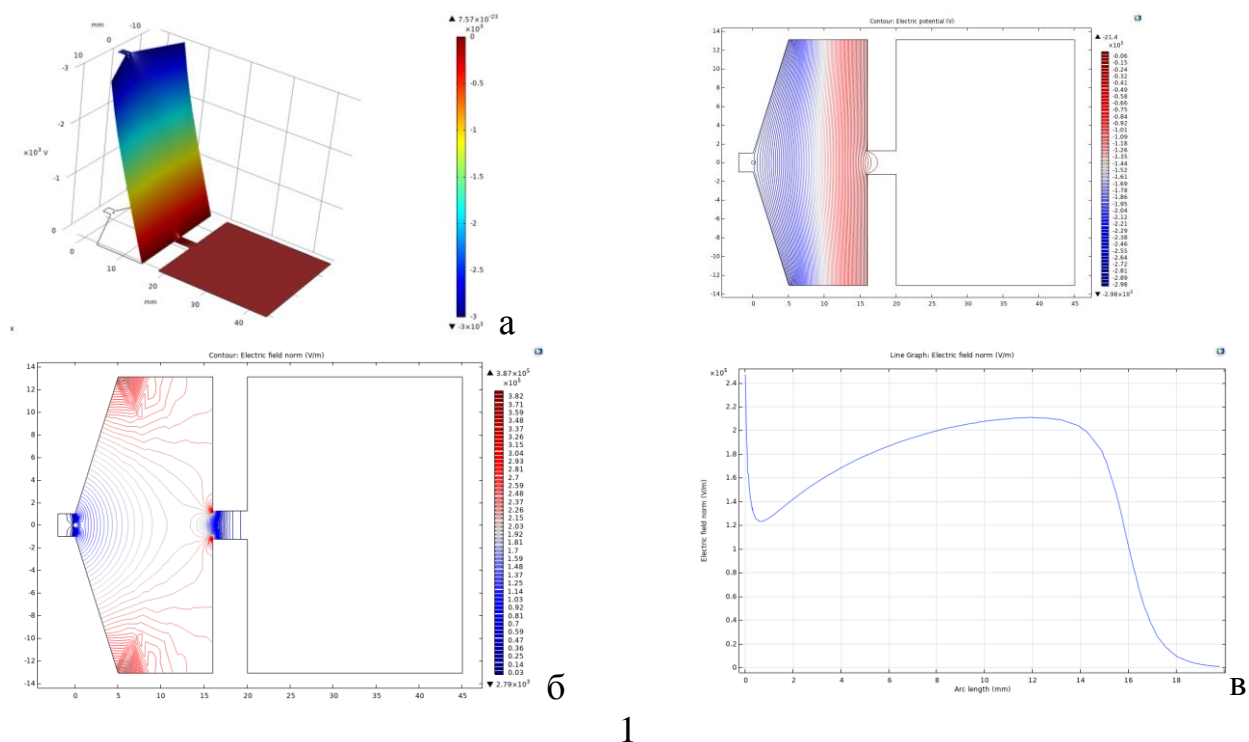
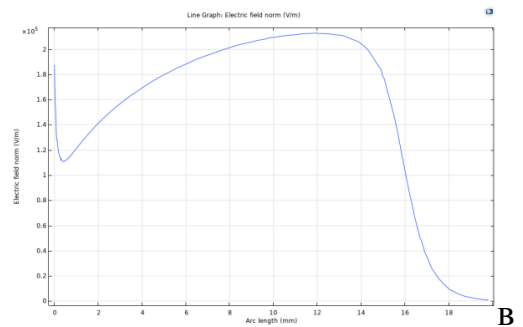
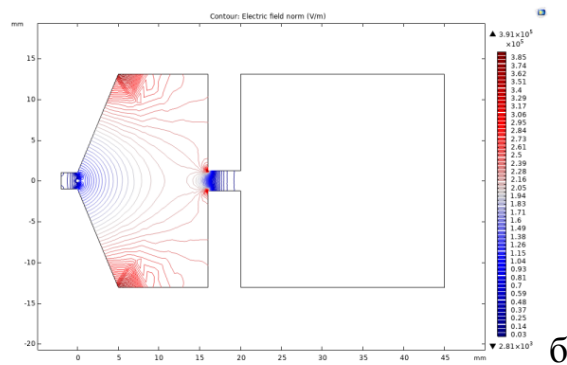
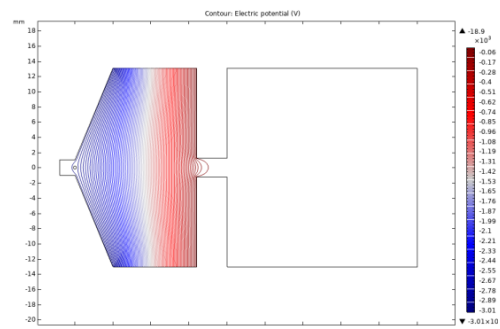
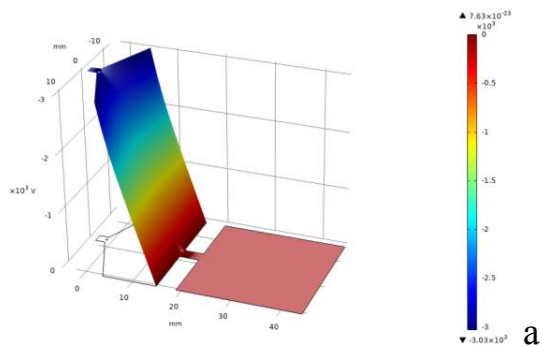
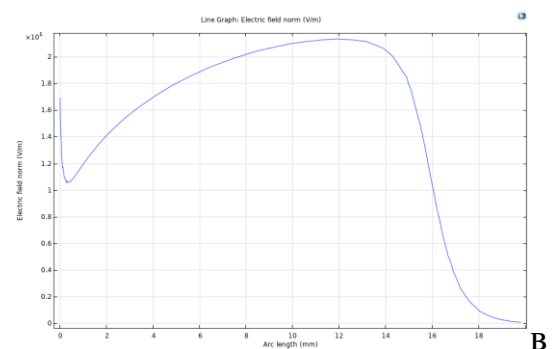
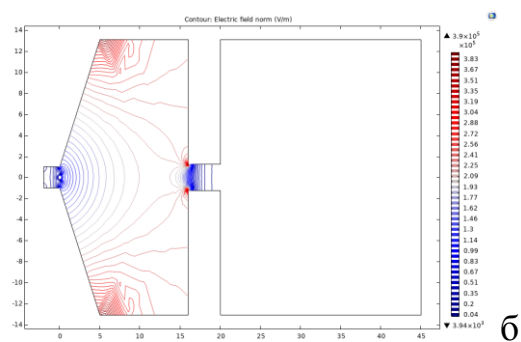
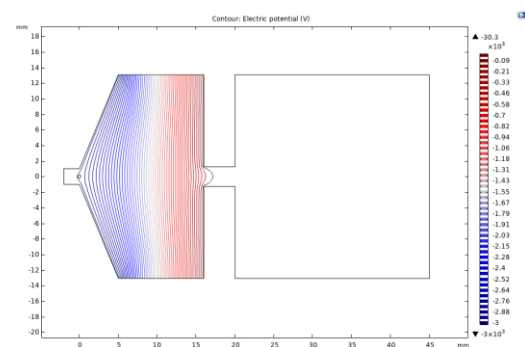
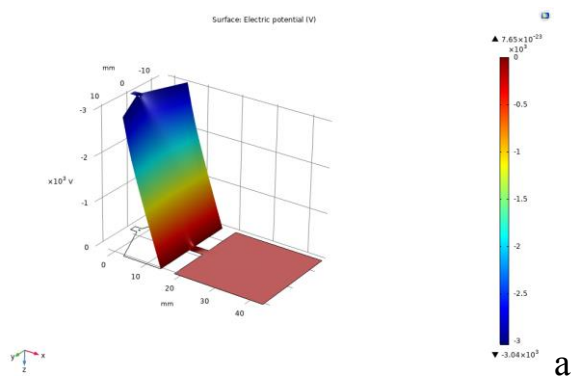


Рисунок 3.4 – Результат розрахунку електростатичного поля в електронній гарматі Пірса при  $I_{\text{роз.}}=12,5 \text{ A}$ ,  $U_{\text{пр}}=3 \text{ кВ}$ ,  $I_{\text{пот}}=210 \text{ mA}$ ,  $U_{\text{мод}}=0 \text{ В}$  (1),  $U_{\text{мод}}=25 \text{ В}$  (2): еквіпотенціальні лінії електростатичного поля між катодом та анодом ЕПГ, В (а) та лінії напруженості електростатичного поля В/м (б), в - розподіл електростатичного поля вздовж осі симетрії



1



2

Рисунок 3.5 – Результат розрахунку електростатичного поля в електронній гарматі Пірса при  $I_{роз.}=12,5$  A,  $U_{пр}=3$  кВ,  $I_{пот}=210$ мА  $U_{мод}=35$  В(1),  $U_{мод}=45$  В(2): еквіпотенціальні лінії електростатичного поля між катодом та анодом ЕПГ, В (а) та лінії напруженості електростатичного поля В/м (б), в - розподіл електростатичного поля вздовж осі симетрії

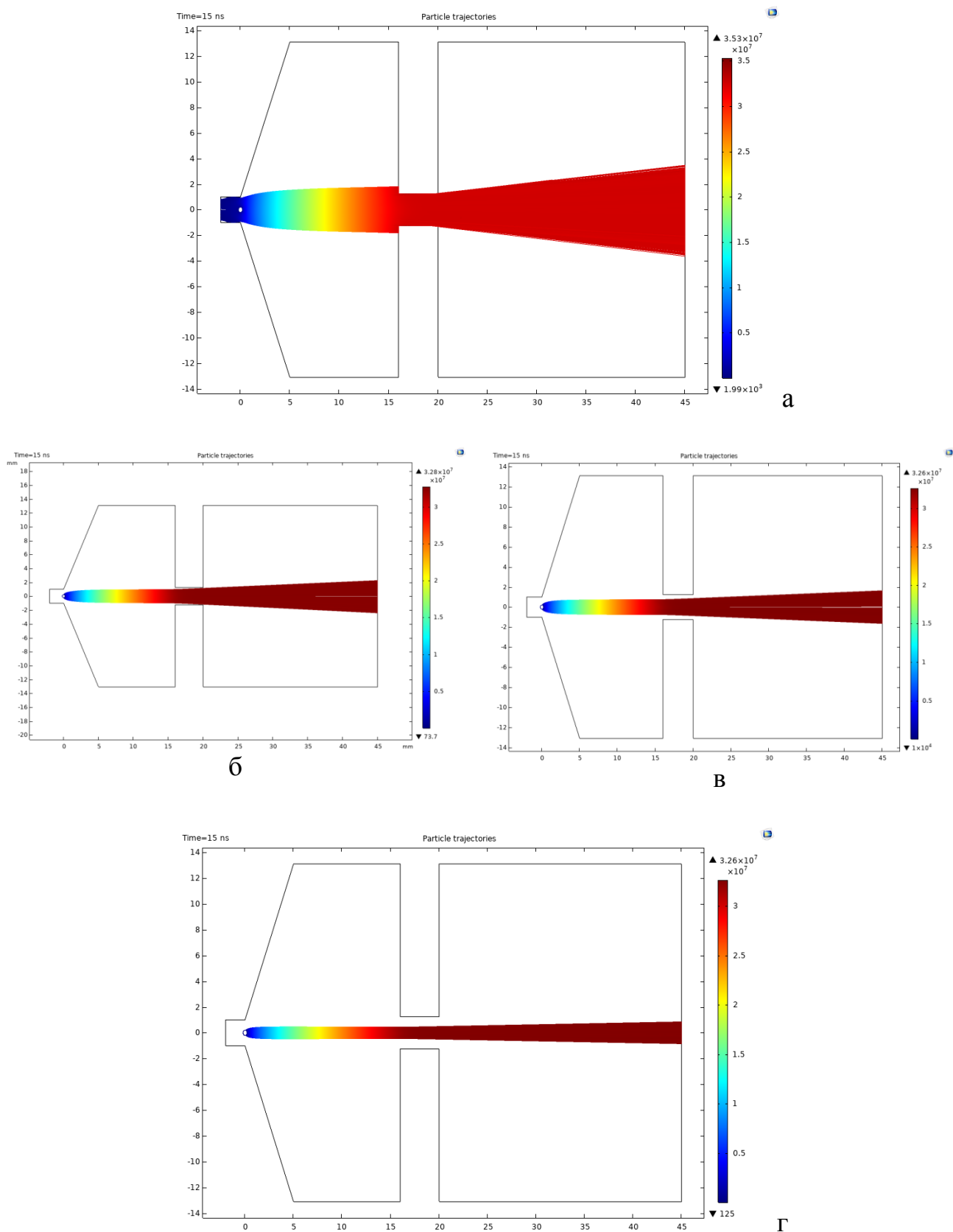


Рисунок 3.6 – Результати моделювання з визначення форми траєкторій електронів в гарматі Пірса при  $I_{роз.}=12,5$  А,  $U_{пр} = 3$  кВ,  $I_{пот}=210$  мА:

а –  $U_{мод} = 0$  В ; б –  $U_{мод} = 25$  В; в –  $U_{мод} = 35$  В; г –  $U_{мод} = 45$  В



### 3.2. Моделювання процесу розповсюдження температури в оптичному елементі

Для розуміння процесів, які відбуваються в результаті взаємодії електронного потоку з тонкими плівками на оптичному склі необхідно побудувати математичну модель для визначення просторового розподілення температури в такій системі.

Розподіл температури в об'єкті (оптичному елементі) є одним з основних показників якості ЕПО і напряму пов'язаний з основними технологічними параметрами.

На рисунку 3.7 представлено зразок, який має форму плоскопаралельної пластини на яку методом резистивного напилювання осаджена тонка металева плівка. На поверхню тіла діє низькоенергетичний електронний потік з довільним заданим розподілом потужності по перерізу, що переміщується вздовж осі ОХ за довільним законом  $s(t)$ . Оскільки товщина плівки є невеликою в порівнянні з товщиною оптичного скла і теплового пограничного шару, який утворюється в результаті дії електронного потоку, тому це дозволяє не розглядати розподілення температури в цьому шарі. Також теплопровідність металевої плівки значно більша в порівнянні з теплопровідністю оптичного скла, тому значна частина теплоти буде розповсюджуватися вздовж поверхні шару. Вважаємо, що в початковий момент часу температура тонкої плівки та оптичного скла однакова. Початкова температура  $T$  зразка в цілому дорівнює температурі 600 К. За рахунок механізмів теплопровідності та променистого теплообміну відбувається теплообмін поверхні зразка з навколишнім середовищем ( $T_c$ ).

Для розрахунку розповсюдження температури у оптичному елементі під час дії низькоенергетичного електронного потоку стрічкової форми була запропонована тривимірна модель (формула 3.12). Використання тривимірної моделі дасть можливість врахувати втрати через бокові поверхні та вплив нерівномірності електронного потоку вздовж стрічки, які можуть потребувати уточнення. В той же час використання тривимірної моделі потребує більше

комп'ютерних ресурсів та часу для проведення розрахунків. Тому для зменшення часу проведення розрахунку тривимірної моделі і враховуючи те, що електронний потік має стрічкову форму, дану тривимірну модель для розрахунку температур у оптичному виробі можна спростити і розглядати дану задачу, як двовимірний випадок у площині  $OXZ$  вважаючи, що температура не змінюється вздовж осі  $OY$ , тобто  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ . Тривимірну модель можна використовувати для розрахунку певних технологічних режимів оброблення, а також для дослідження та порівняння невідповідності рівномірного розподілу температури вздовж катоду. В даному розділі буде представлено розрахунок температури з використанням дво- та тривимірної моделі.

У спрощеному вигляді задача представлена на рисунку 3.7 (на рисунку товщина тонкої плівки та товщина поверхні оптичного скла не відповідають геометричним розмірам і зображені схематично).

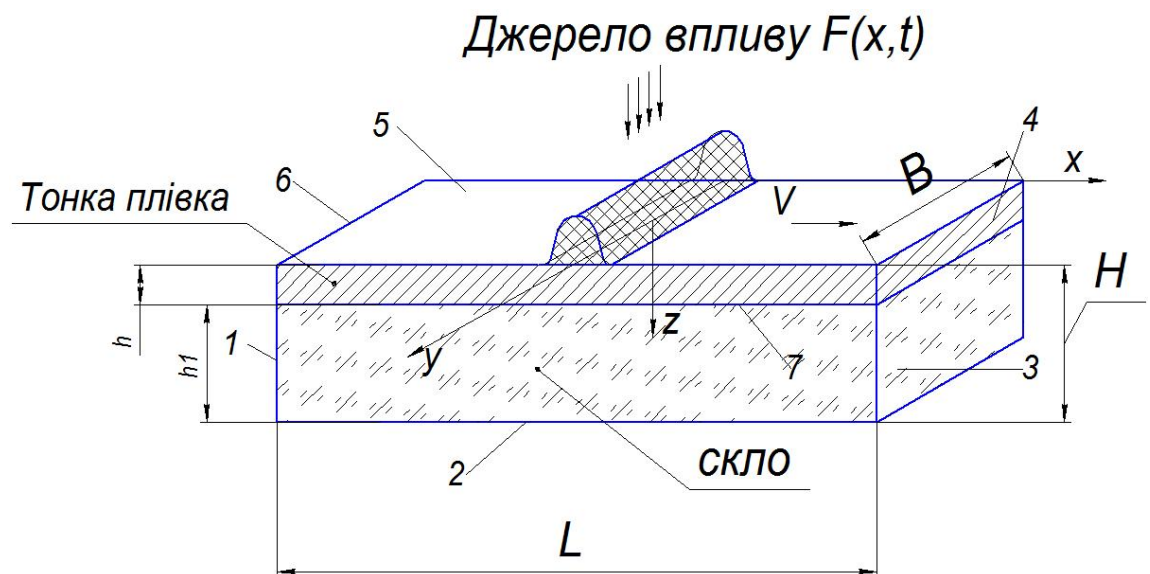


Рисунок 3.7 – Схема дії рухомого низькоенергетичного електронного потоку на поверхню оптичного елемента прямокутної форми:  $F(x,t)$  – розподіл потужності джерела (розподіл Гауса),  $H$ ,  $L$ ,  $B$  – відповідно, товщина, довжина і ширина виробу;  $h$  – товщина тонкої плівки;  $h_1$  – товщина підкладки;  $H$  – товщина системи в цілому  $H = h + h_1$ ;  $V$  – швидкість переміщення оптичного виробу в зоні дії електронного потоку.

Розподілу потужності при електронно-променевому обробленні описується згідно закону  $F(x,t)$ . Для опису розподілу температури всередині деталі, використовуються диференціальні рівняння:

для тривимірної моделі

$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.12)$$

для двовимірної

$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3.13)$$

$\lambda(T)$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);  $C_v(T)$  – об'ємна теплоємність, Дж/(кг·К)

*Початкові та граничні умови*

Початкові умови:  $T(x, z)|_{t=0} = T_0$

Границя 5 (рисунок 3.7): тепловий потік через поверхню (нелінійні крайові умови)

$$-n \left( -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = F(x, t) + \varepsilon \sigma (T_c^4 - T^4) \quad (3.14)$$

Границі 4: тепловий потік через поверхню (нелінійні крайові умови)

$$-n \left( -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \varepsilon \sigma (T_c^4 - T^4) \quad (3.15)$$

Границі 1, 2, 3: температура на поверхні (крайові умови I-го роду)

$$T(x, y) = T_0, \quad T(x, y) \in S_{1,2,3} \quad (3.16)$$

Границя 7: тепловий потік через поверхню тонкої плівки

$$-q_d = -\frac{1}{2} d_s \rho C_p \frac{\partial T_d}{\partial t} - \frac{(T_u - T_d)}{R_s} \quad (3.17)$$

$$-q_u = -\frac{1}{2}d_s \rho C_p \frac{\partial T_u}{\partial t} - \frac{(T_d - T_u)}{R_s} \quad (3.18)$$

де  $R_s$  – термічний опір плівки

$$R_s = -\frac{d_s}{\lambda} \quad (3.19)$$

$q_s$  – густина теплового потоку між поверхнею та тонкою плівкою

$q_u$  - густина теплового потоку між поверхнею та навколишнім середовищем

*Розробка цифрової моделі для визначення розподілу температур в об'єкті, що досліджується.* Для здійснення процесу оптимального керування параметрами потоку електронів, розв'язок поставленої задачі буде проведений з використанням чисельних методів.

Для розв'язку поставленої математичної задачі було використано, як і для визначення параметрів ЕПГ Пірса, спеціалізоване програмне забезпечення COMSOL Multiphysics 5.6. Модулі даної програми містять спеціалізовані інструменти для моделювання процесів та явищ в галузях електродинаміки та оптики, механіки та акустики, гідродинаміки і теплопередачі, хімії та електрохімії.

За допомогою даної програми було проведено моделювання в відповідності до поставленої вище задачі теплопровідності.

Алгоритм побудови фізичної моделі складається з наступних етапів.

1) Обирається розділ (у вікні навігатора моделей) в якому буде проводиться моделювання та розрахунок. Для розв'язку даної задачі використовується розділ Heat transfer для нестационарних моделей (рисунок 3.8).

2) Робиться креслення геометрії моделі з відповідними розмірами оптичного елемента, що оброблюється.

3) Граничні умови задачі встановлюються відповідно до умов теплової задачі рисунок 3.8.

4) Встановлюються фізичні властивості оптичного скла К8, та тонкої плівки(фізичні властивості алюмінію). Оскільки питома теплоємність  $C_p$  та коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  залежать від температури, а також для зменшення часу проведення розрахунків, були використані наступні залежності :  $\lambda(T)=0,51+T \cdot 0,00121$  ;  $C_p(T)=992+T \cdot 0,178$ .

5) Наступним етапом є розбиття, в автоматичному режимі з урахуванням необхідної точності розрахунку, об'єкта на кінцеві елементи. Для даної теплової моделі було використано розбиття на кінцеві елементи у формі трикутників (функція free tetrahedral) з параметром Predefined fine, а також розбиття на кінцеві елементи у формі прямокутників (функція quadrilateral) з параметром Predefined extra fine. Таке розбиття використовується для майже всього об'єкту моделювання.

Для границі 5 використовується розбиття з максимальним розміром кінцевих елементів  $10^{-5}$  м (в результаті впливу електронного потоку виникають найбільші градієнти температури), для границь 4, 6 максимальний розмір кінцевих елементів складає –  $5 \cdot 10^{-4}$  м ( в результаті теплового випромінювання з цих поверхонь виникають градієнти температур). На рисунку 3.10 представлено результати розбиття об'єкту на сітку (складається 17415 та 22050 елементів).

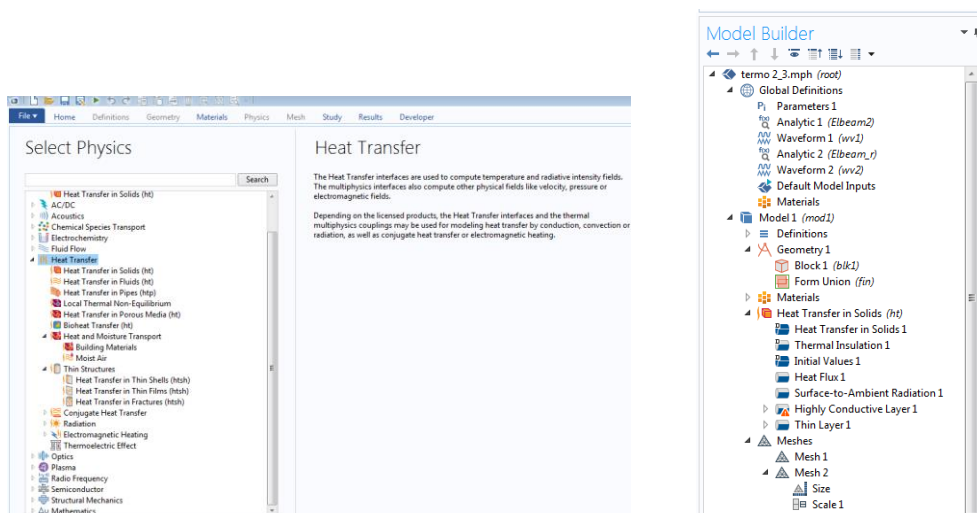


Рисунок 3.8 – Навігатор моделей COMSOL та граничні умови

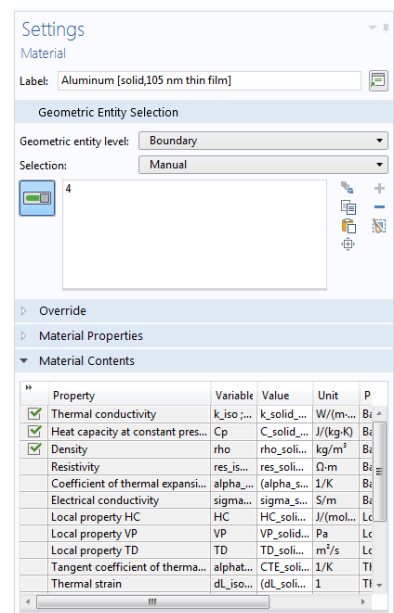
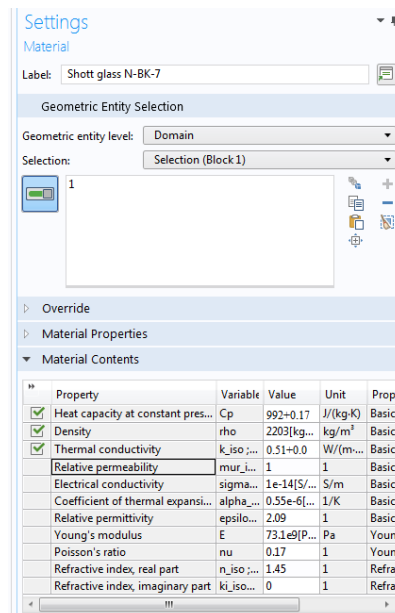


Рисунок 3.9 – Вікно фізичних властивостей (скло K8 та алюміній)

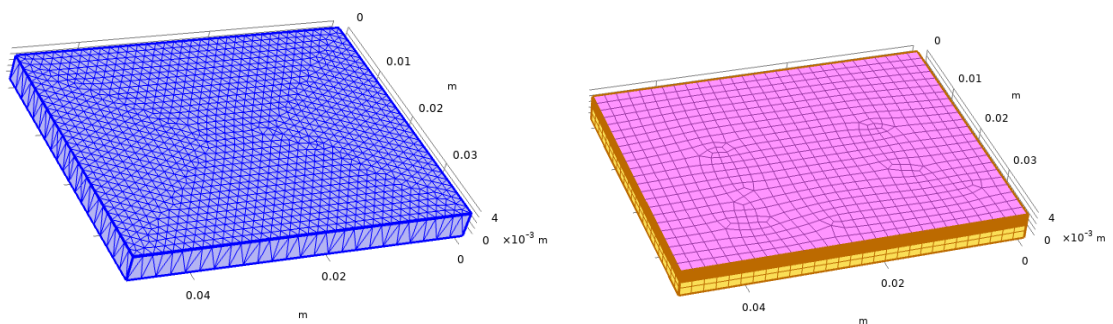
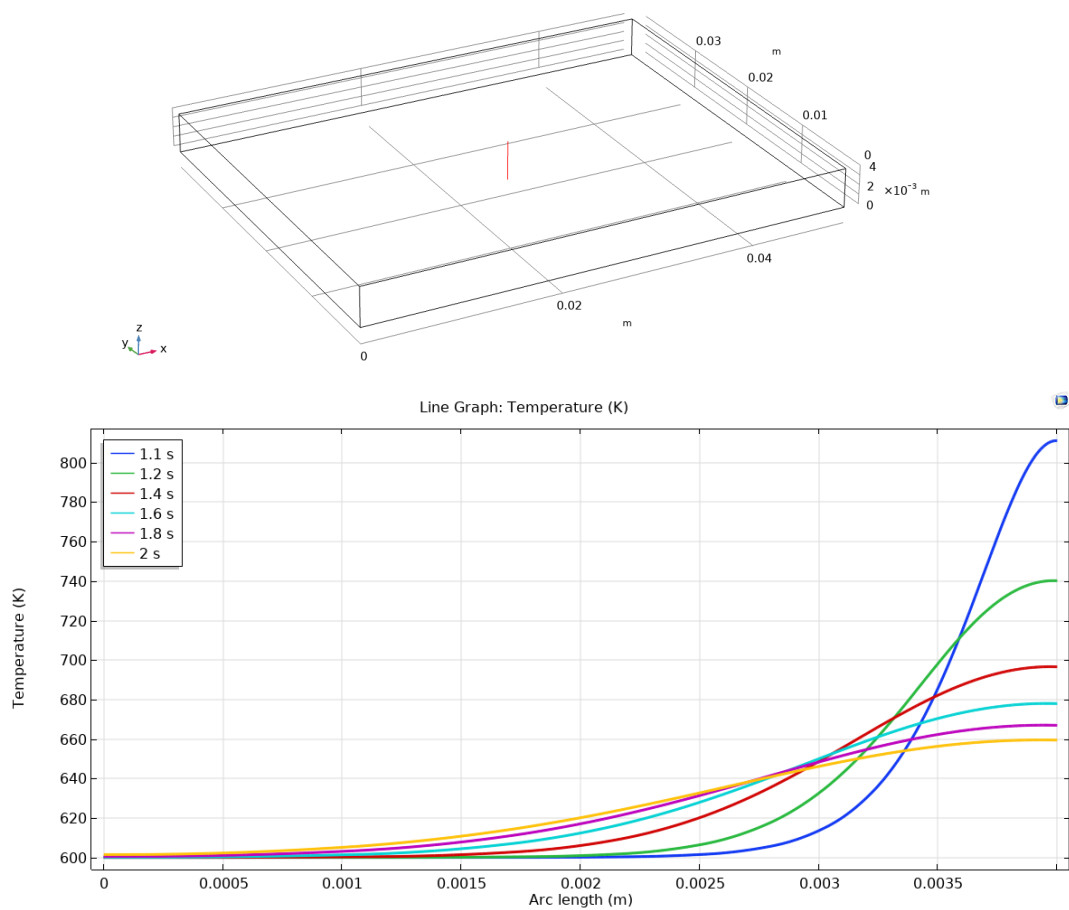


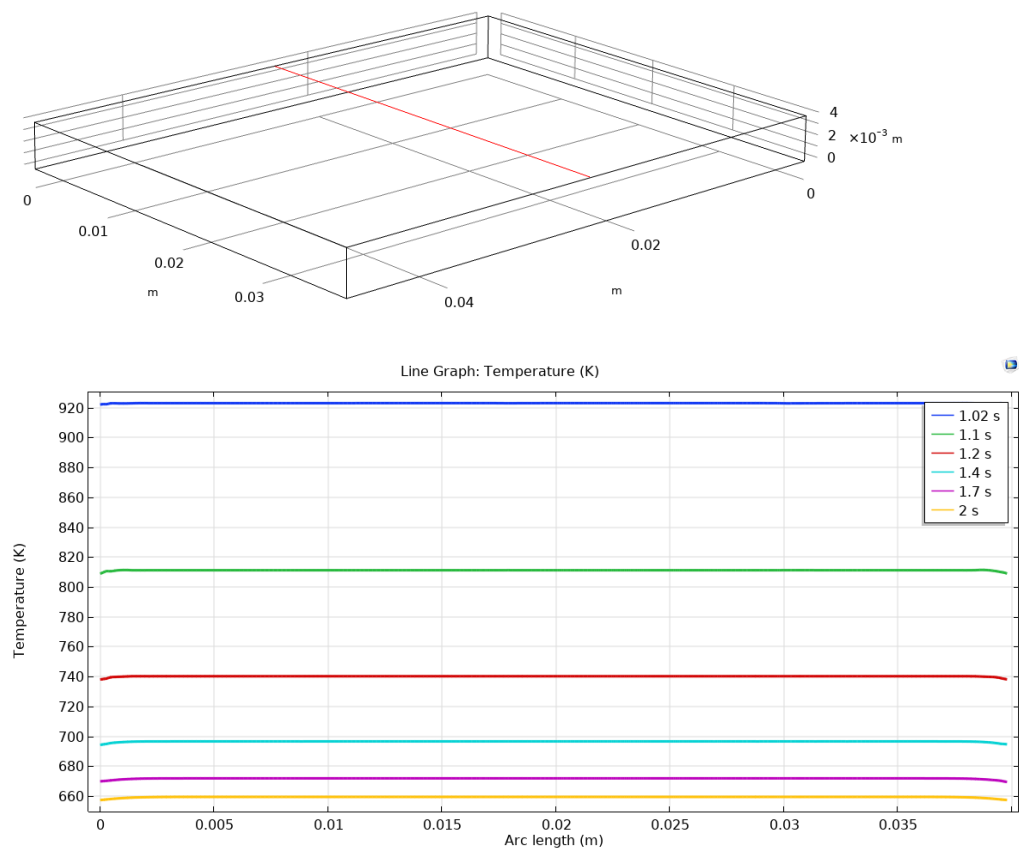
Рисунок 3.10 – Зображення моделі в режимі розбиття на кінцеві елементи

б) Розв'язок математичної задачі. Перед початком розрахунку необхідно врахувати час проходження електронного потоку по поверхні оптичного виробу(в залежності від геометричних розмірів заготовки). Час обирається в діапазоні від 0 до 10 секунд, з інтервалом 0,1 с. Також необхідно вказати відносну точність вирішення задачі, яка для даної задачі становить 1 % та абсолютну точність 0,1 °C.

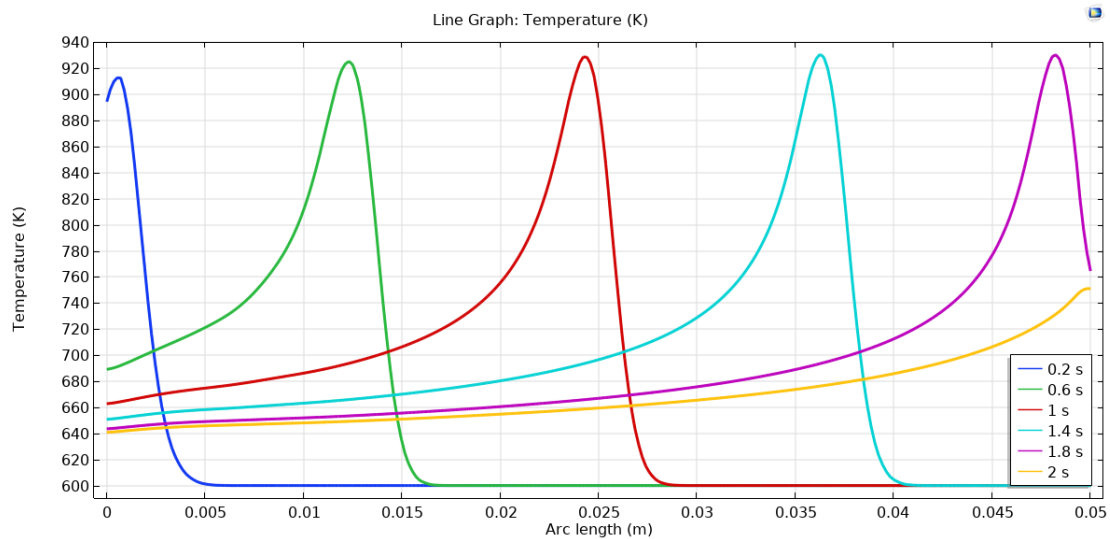
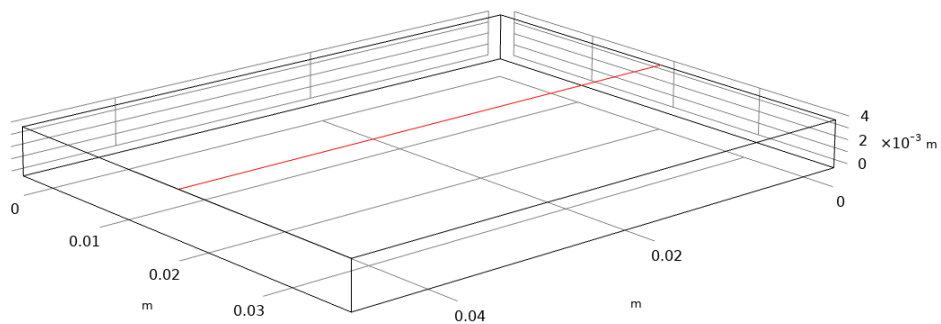
На рисунку 3.11 представлені результати математичного моделювання розподілу температури у вигляді графіків.



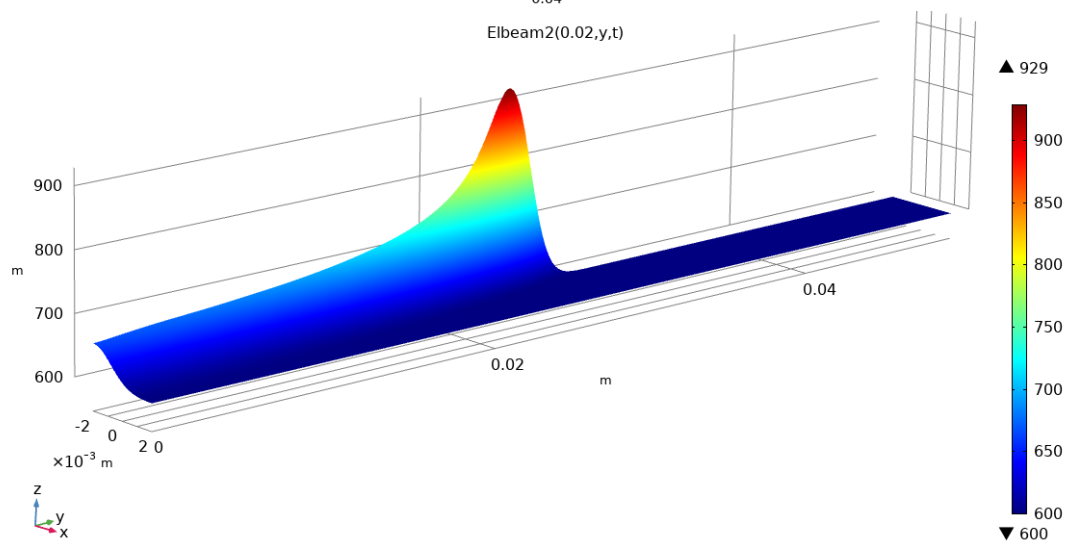
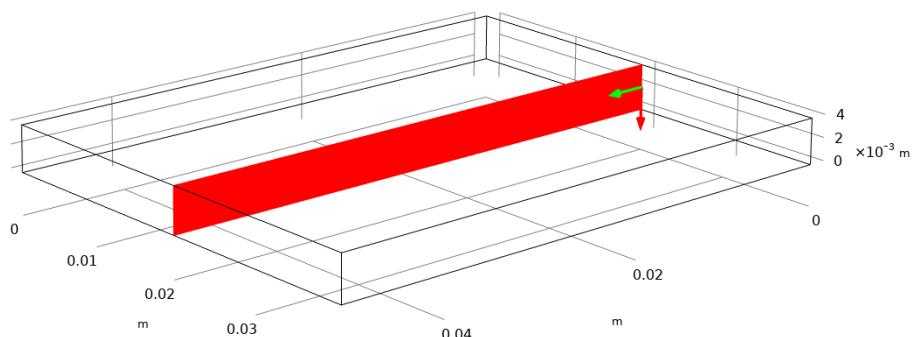
а – розподіл температури по глибині зразка



б – розподіл температури на поверхні зразка

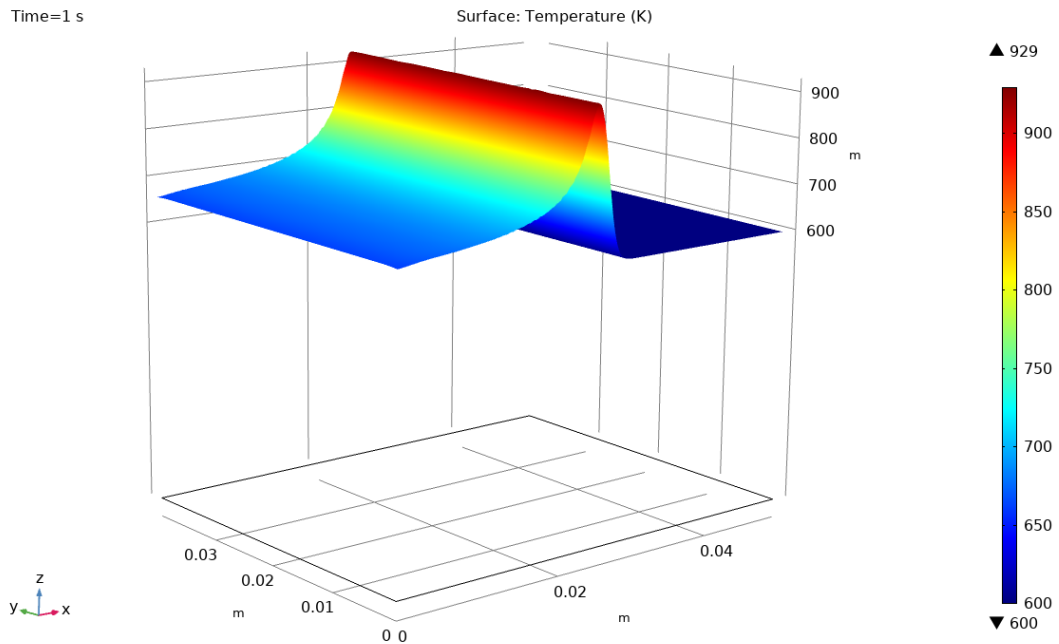


в – розподіл температури на поверхні зразка



г – розподіл температури по глибині зразка



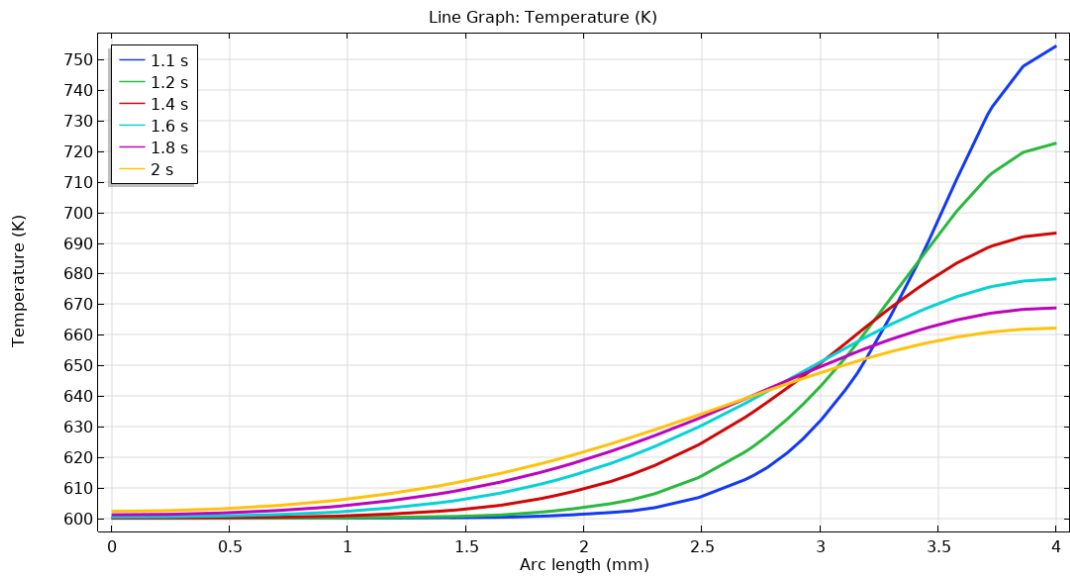


д – розподіл температури на поверхні зразка

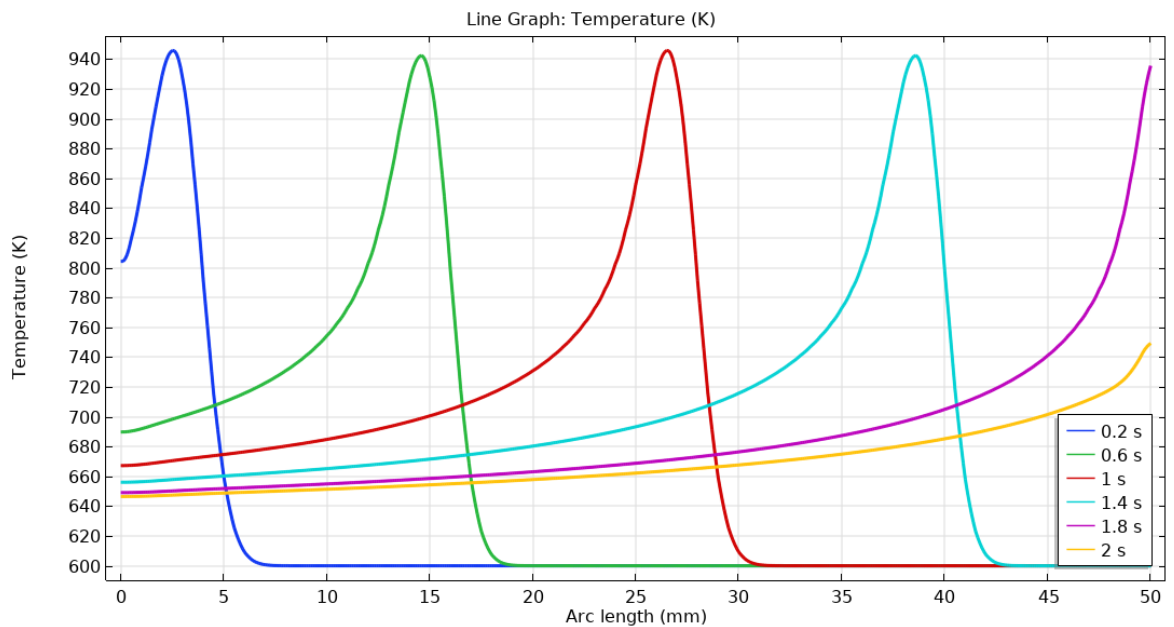
Рисунок 3.11 – Результати розрахунку розподілу температури в різних площинах оптичного елемента, який складається з оптичного скла K8 та тонкої алюмінієвої плівки, технологічні параметри ЕПО:  $I_k = 12,5$  А,  $U_{пр} = 3$  кВ,  $U_{мод} = 35$  В,  $I_{пот} = 210$  мА,  $V = 1,35$  см/с, початкова температура  $T_0 = 600$ К (тривимірна модель)

Як видно з рисунка 3.11.б температура вздовж катоду поширюється практично рівномірно, тому для спрощення розрахунку можна використовувати двовимірну модель.

Також було проаналізовано вплив теплового випромінювання з поверхні оптичного скла, яке було введено в розрахункову модель, на відхилення температури. Встановлено, що відхилення температури не перевищує 1,7%, а найбільша похибка виникає на краях заготовки. Тому врахування радіаційних витрат тепла дасть можливість підвищити точність моделювання процесу оброблення по всій поверхні оптичного елемента.



а – розподіл температури по глибині зразка



б – розподіл температури на поверхні зразка

Рисунок 3.12 – Результати розрахунку розподілу температури в різних площинах оптичного елемента, який складається з оптичного скла К8 та тонкої алюмінієвої плівки, технологічні параметри ЕПО:  $I_k = 12,5$  А,  $U_{np} = 3$  кВ,  $U_{mod} = 35$  В,  $I_{nom} = 210$  мА,  $V = 1,35$  см/с, початкова температура  $T_0 = 600$  К (двовимірний модель)

### 3.3 Експериментальні дослідження характеристик ЕПГ Пірса

Для отримання стабільного розподілу енергії електронного потоку ЕПГ Пірса необхідно провести дослідження її вольт-амперних характеристик. В даній конструкції ЕПГ Пірса, використовується вольфрамовий катод діаметром 0,4 мм, ширина анодної щілини складає  $a = 2,5$  мм, Відстань від гармати Пірса (зовнішньої поверхні анода) до поверхні оброблення складає  $H = 25 \text{ мм} \pm 0,1$  мм, довжина катода 90 мм, електронний потік має форму стрічки довжиною 60 мм.

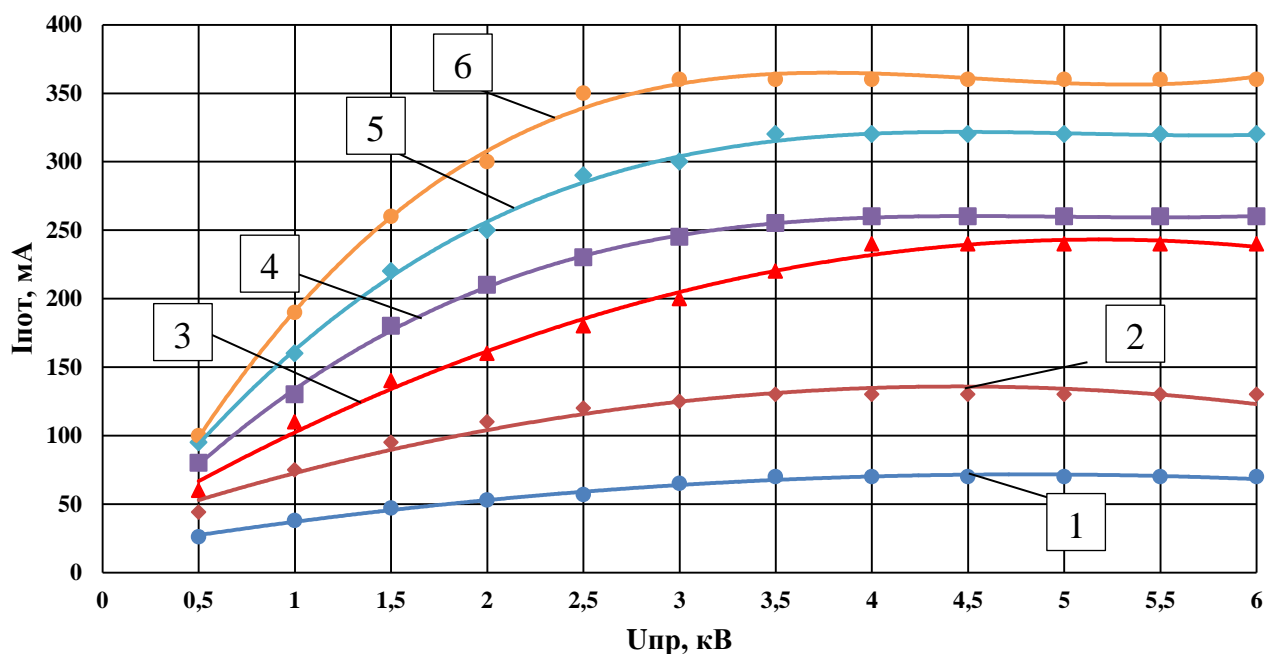


Рисунок 3.13 – Залежність струму електронного потоку ( $I_{\text{пот}}$ ) від прискорюючої напруги ( $U_{\text{пр}}$ ) при постійних значеннях струму розжарення ( $I_{\text{роз}}$  1 – 11,5 А, 2 – 12 А, 3 – 12,5 А, 4 – 13 А, 5 – 13,5 А, 6 – 14 А)

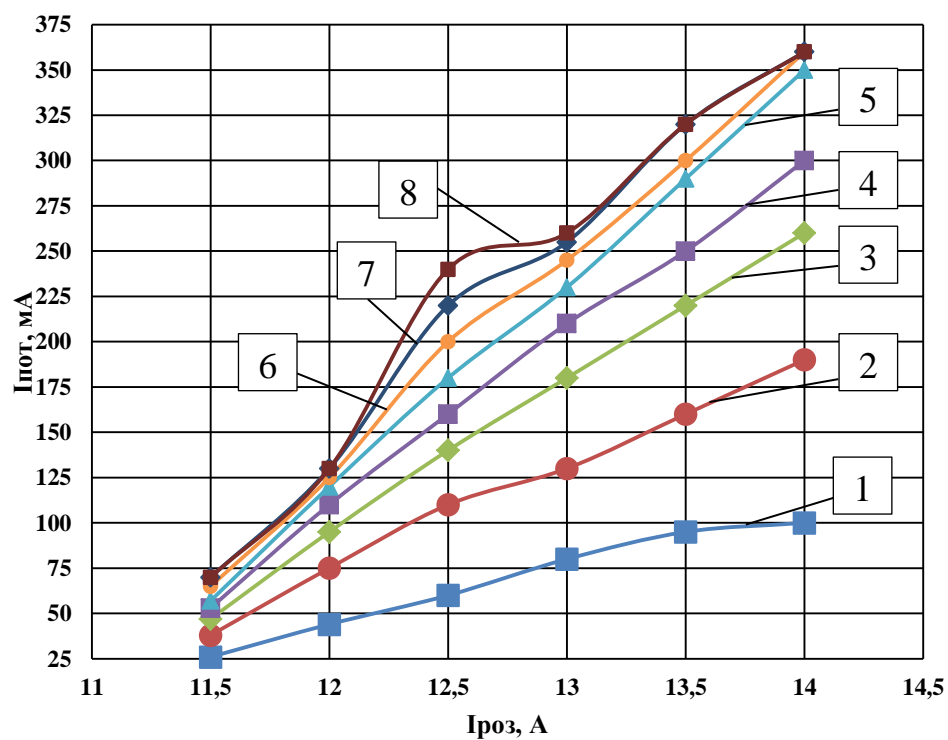


Рисунок 3.14 – Залежність струму електронного потоку ( $I_{\text{пот}}$ ) від струму розжарення ( $I_{\text{роз}}$ ) при постійних значеннях прискорюючої напруги ( $U_{\text{пр}}$  1 – 0,5 кВ, 2 – 1 кВ, 3 – 1,5 кВ, 4 – 2 кВ, 5 – 2,5 кВ, 6 – 3,0 кВ, 7 – 3,5 кВ, 8 – 4,0 кВ)

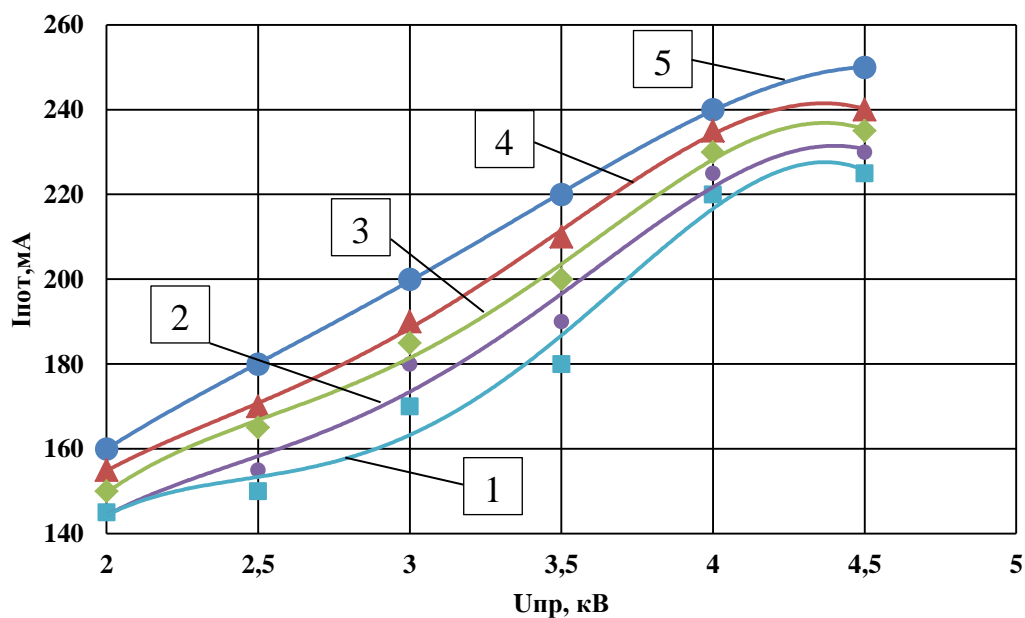


Рисунок 3.15 – Залежність струму електронного потоку ( $I_{\text{пот}}$ ) від прискорюючої напруги ( $U_{\text{пр}}$ ) при постійних значеннях напруги на модуляторі ( $U_{\text{мод}}$  1 – 25 А, 2 – 35 А, 3 – 45 А, 4 – 55 А, 5 – 65 А)

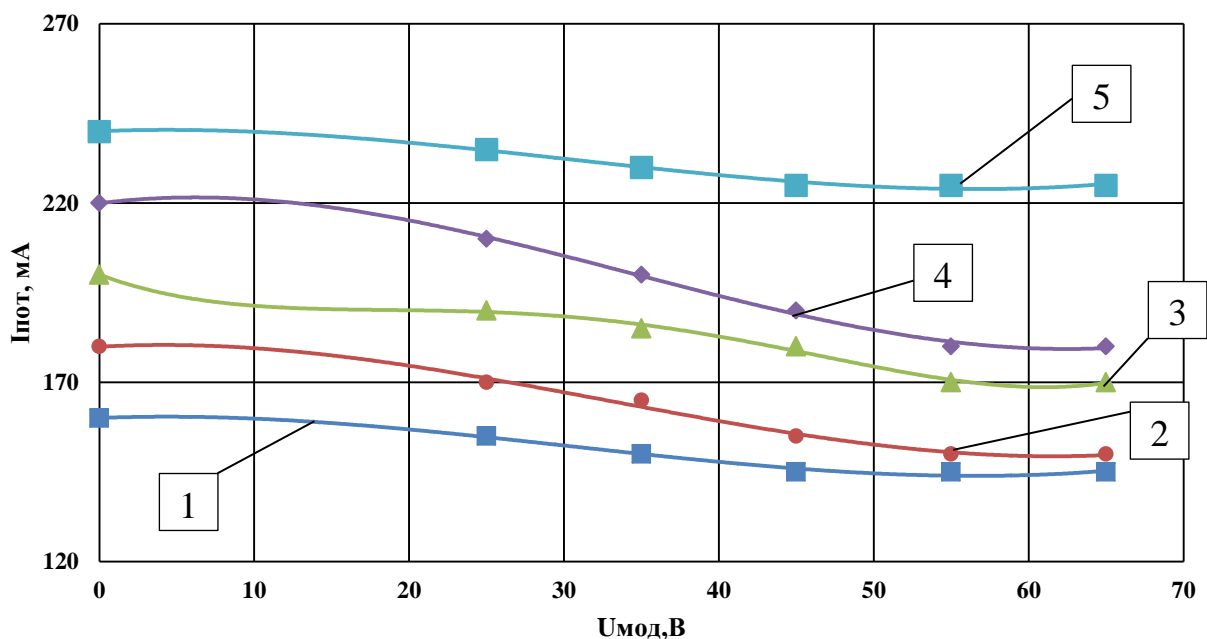


Рисунок 3.16 – Залежність струму електронного потоку ( $I_{\text{пот}}$ ) від напруги на модуляторі ( $U_{\text{мод}}$ ) при постійних значеннях прискорюючої напруги ( $U_{\text{пр}}$  : 1 – 2,0 кВ, 2 – 2,5 кВ, 3 – 3,0 кВ, 4 – 3,5 кВ, 5 – 4,0 кВ)

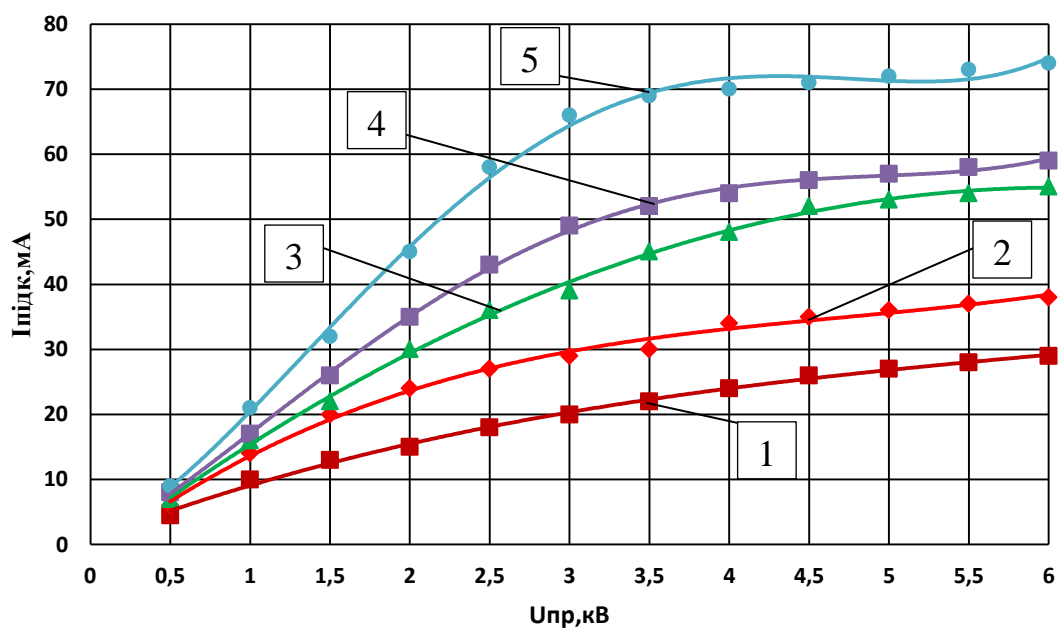


Рисунок 3.17 Залежність струму електронного потоку, який потрапляє на підкладинку ( $I_{\text{під}}$ ) від прискорюючої напруги ( $U_{\text{пр}}$ ) при постійних значеннях струму розжарення ( $I_{\text{роз}}$  1 -12,0 А, 2 – 12,5 А, 3 – 13,0 А, 4 – 13,5 А, 5 – 14,0 А)

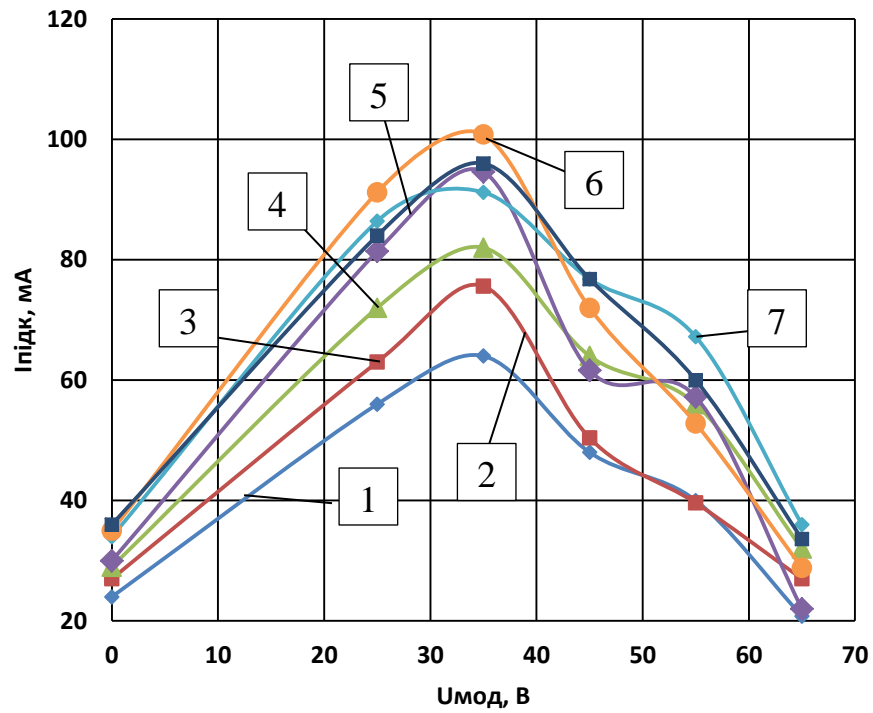


Рисунок 3.18 – Залежність струму електронного потоку, який потрапляє на підкладинку ( $I_{\text{підк}}$ ) в залежності від напруги на модуляторі ( $U_{\text{мод}}$ ) при постійних значеннях прискорюючої напруги ( $U_{\text{пр}}$  1 – 2,0 кВ, 2 – 2,5 кВ, 3 – 3,0 кВ, 4 – 3,5 кВ, 5 – 4,0 кВ, 6 – 4,5 кВ, 7 – 5,0 кВ)

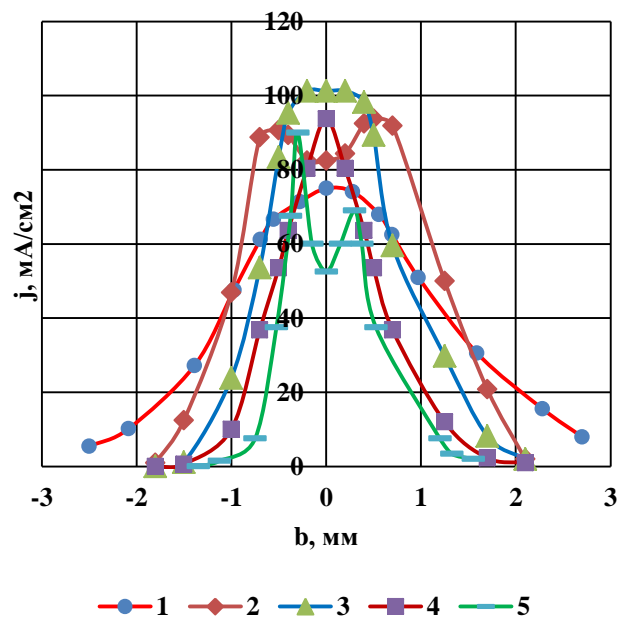


Рисунок 3.19 – Зондові характеристики електронного потоку: розподіл густини струму розрахований на основі зондового струму в електронному потоці ( $U_{\text{пр}}=2000\text{В}$  1 –  $U_{\text{мод}}=0\text{ В}$ , 2 –  $U_{\text{мод}}=25\text{ В}$ , 3 –  $U_{\text{мод}}=35\text{В}$ , 4 –  $U_{\text{мод}}=45\text{ В}$ , 5 –  $U_{\text{мод}}=55\text{ В}$ )

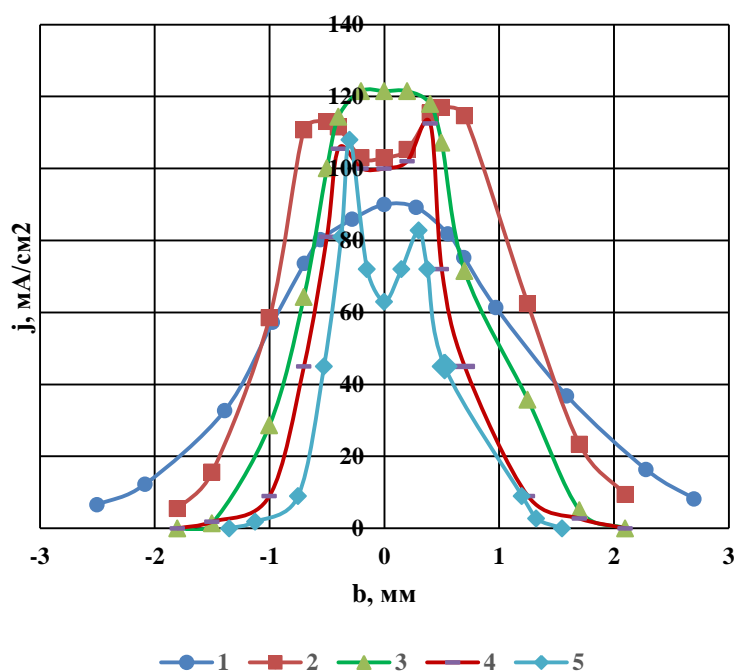


Рисунок 3.20 – Зондові характеристики електронного потоку: розподіл густини струму розрахований на основі зондового струму в електронному потоці ( $U_{пр}=2500$  В 1 –  $U_{мод}=0$  В, 2 –  $U_{мод}=25$  В, 3 –  $U_{мод}=35$  В, 4 –  $U_{мод}=45$  В, 5 –  $U_{мод}=55$  В)

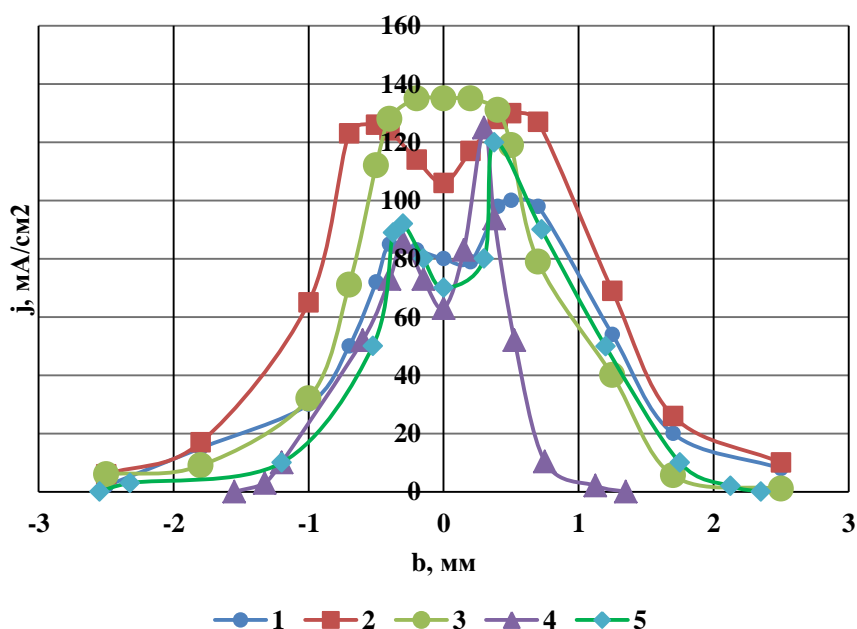


Рисунок 3.21 – Зондові характеристики електронного потоку: розподіл густини струму розрахований на основі зондового струму в електронному потоці ( $U_{пр}=3000$  В 1 –  $U_{мод}=0$  В, 2 –  $U_{мод}=25$  В, 3 –  $U_{мод}=35$  В, 4 –  $U_{мод}=45$  В, 5 –  $U_{мод}=55$  В)

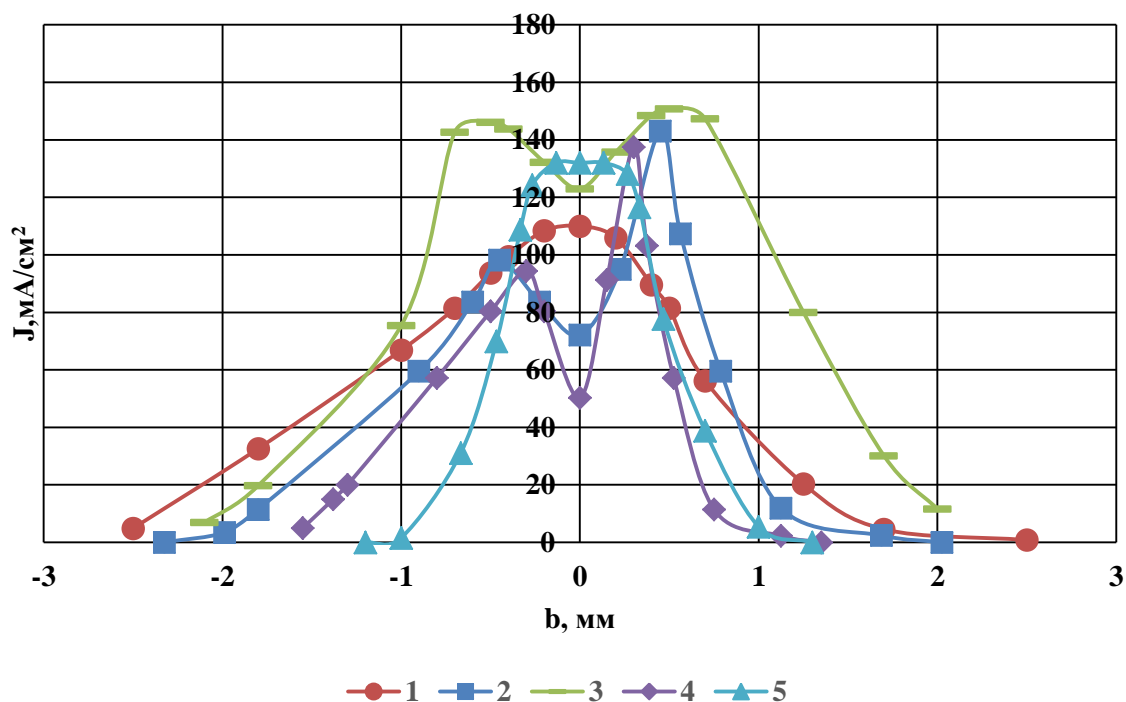


Рисунок 3.22 – Зондові характеристики електронного потоку: розподіл густини струму розрахований на основі зондового струму в електронному потоці ( $U_{пр}=3500$  В 1 –  $U_{мод}=0$  В, 2 –  $U_{мод}=25$  В, 3 –  $U_{мод}=35$ В, 4 –  $U_{мод}=45$  В, 5 –  $U_{мод}=55$ В)

В результаті проведеного зондування низькоенергетичного електронного потоку стрічкової форми було встановлено, що при різних параметрах ЕПГ Пірса на практиці спостерігаються різні закони розподілу густини струму, які є відмінними від гаусівського розподілення (рисунок 3.23). В ЕПГ прискорююче поле максимальне в центрі модулятора і знижується до його країв. Тому катод навантажений нерівномірно і найбільший добір струму відбувається з його центральної ділянки. При зміні напруги на модуляторі струм пучка також зазнає змін по величині, за рахунок зміни просторового заряду на катоді, при цьому змінюється величина ділянки катода. Тому зміна  $U_m$  приводить до зміни робочої поверхні катода відповідно до зміни струму променю.

Також встановлено, що розташування дріт'яного вольфрамового катода відносно модулятора має вплив на електронний потік. Вольфрамовий катод має обмежений термін впливу, тому після кожної заміни форма електронного потоку може змінюватися.



Зондування електронного потоку в процесі ЕПО дасть можливість контролювати та управляти параметрами електронного потоку, що призведе до підвищення якості КЕПО оптичних елементів.

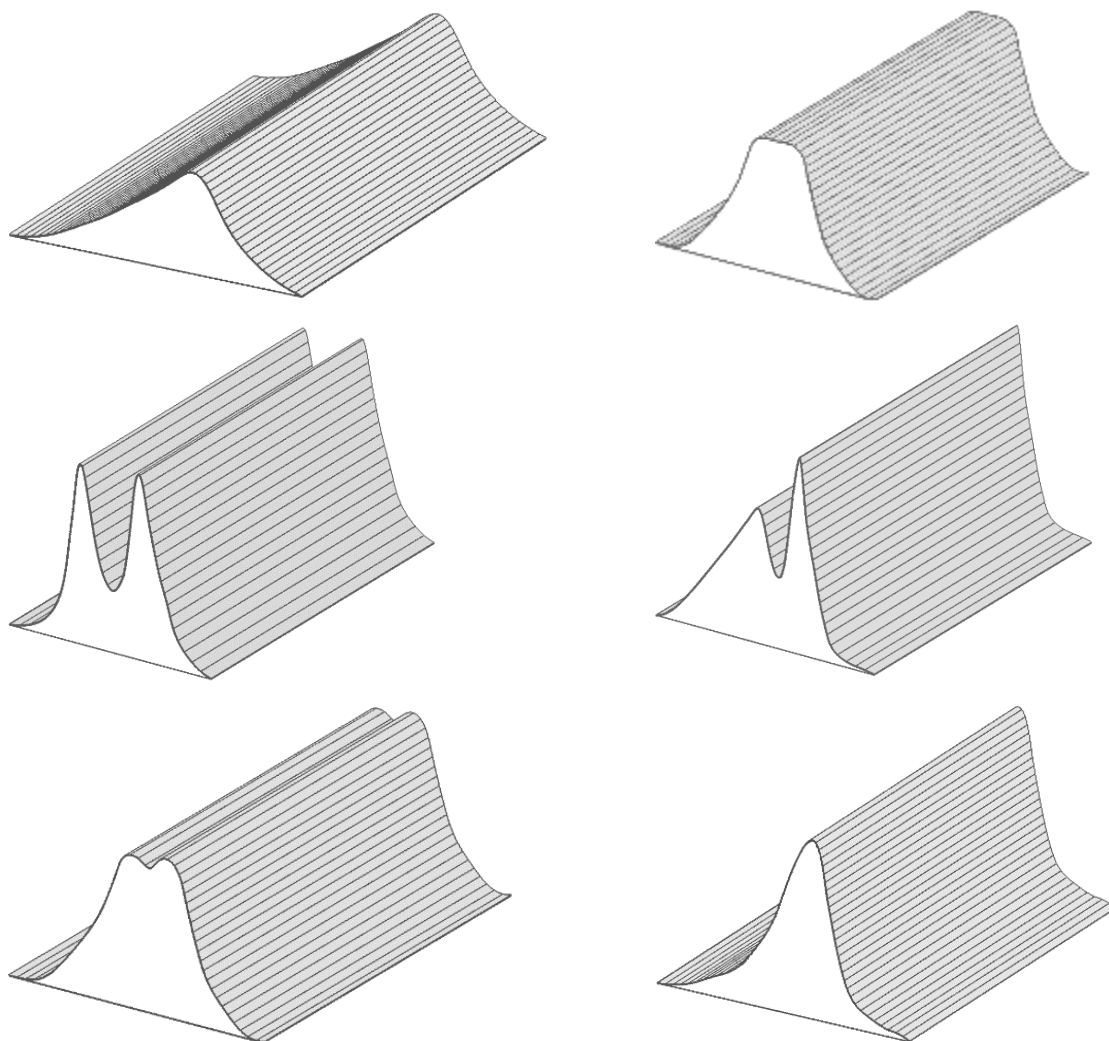


Рисунок 3.23 – Форма розподілу густини струму електронного потоку при різних режимах ЕПО

### 3.4 Висновки до розділу

1. Побудована комп'ютерна модель ЕПГ Пірса заданої конструкції, та проведено розрахунки електростатичного поля та траєкторії руху електронів з урахуванням впливу об'ємного заряду та початкової швидкості.

2. Запропоновано для підвищення ефективності електронно-оптичної системи ЕПГ Пірса в якості керуючого електроду використовувати модулятор. Проведено розрахунки з визначення впливу потенціалу модулятора на форму електронного потоку.

3. Встановлено, що зі збільшенням напруги на модуляторі, струм аноду практично відсутній. Однак збільшення напруги на модуляторі призводить до зменшення сили струму, який потрапляє на оптичний елемент в процесі оброблення.

4. Розроблено математичну модель, яка дозволяє розраховувати розподіл температури в оптичному елементі під час КЕПО.

5. Проведено експериментальне дослідження з визначення форми, розмірів та розподілу густини струму низькоенергетичного стрічкового електронного потоку. Встановлено, що при різних параметрах ЕПГ Пірса на практиці спостерігаються різні закони розподілу густини струму, які є відмінними від гаусівського розподілення. Отримані експериментальні дані в межах 10-15% збігаються з теоретичними результатами. Зондування електронного потоку в процесі КЕПО дасть можливість контролювати та управляти параметрами електронного потоку, що призведе до підвищення якості КЕПО оптичних елементів.

## РОЗДІЛ 4.

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В даному розділі проводилися дослідження мікронерівностей поверхні оптичного скла до та після ЕПО. Побудовані залежності середньоарифметичної шорсткості поверхні в залежності від технологічних параметрів оброблення. Проведено дослідження поверхні оптичного скла з використанням інтерференційного методу. Визначено коефіцієнт пропускання оптичного скла після ЕПО. Визначено шорсткість тонких плівок алюмінію та срібла отриманих з використанням КЕПО. Проведено дослідження стійкості до впливу морської води тонких покриттів алюмінію. Досліджено властивості тонких плівок золота осаджених на модифіковану ЕПО з двох сторін поверхню оптичного скла ТК14. Наведено інші можливості використання КЕПО для створення функціональних елементів.

4.1. Експериментальні дослідження якісних характеристик поверхні з оптичного скла після електронно-променевого оброблення

4.1.1. Визначення мікронерівностей поверхні оптичного скла обробленого електронним потоком

Поверхня оптичного скла марки К8, яка має форму круглої, плоскопаралельної пластини діаметром 20 мм, товщиною 2 мм, та марки ТК14, яка має розміри 20x20 мм товщиною 1 мм до та після ЕПО досліджувалася в лабораторії “Прикладної оптики та атомно-силової мікроскопії” кафедри фундаментальних дисциплін та прикладного матеріалознавства ЧДТУ.

На рисунку 4.1 представлено результати дослідження мікрогеометрії поверхні оптичного скла марки К8 до та після ЕПО методом АСМ рисунок 4.1. В результаті проведених досліджень встановлено, що в порівнянні з вихідною поверхнею мікрошорсткість якої складає  $Ra = 30...100$  нм (скло К8),  $Ra = 40...70$

нм (скло ТК14) після ЕПО мікrorельєсткість становить  $Ra = 1,5...10,0$  нм (скло К8) та  $Ra = 2,0...8,1$  нм (скло ТК14).

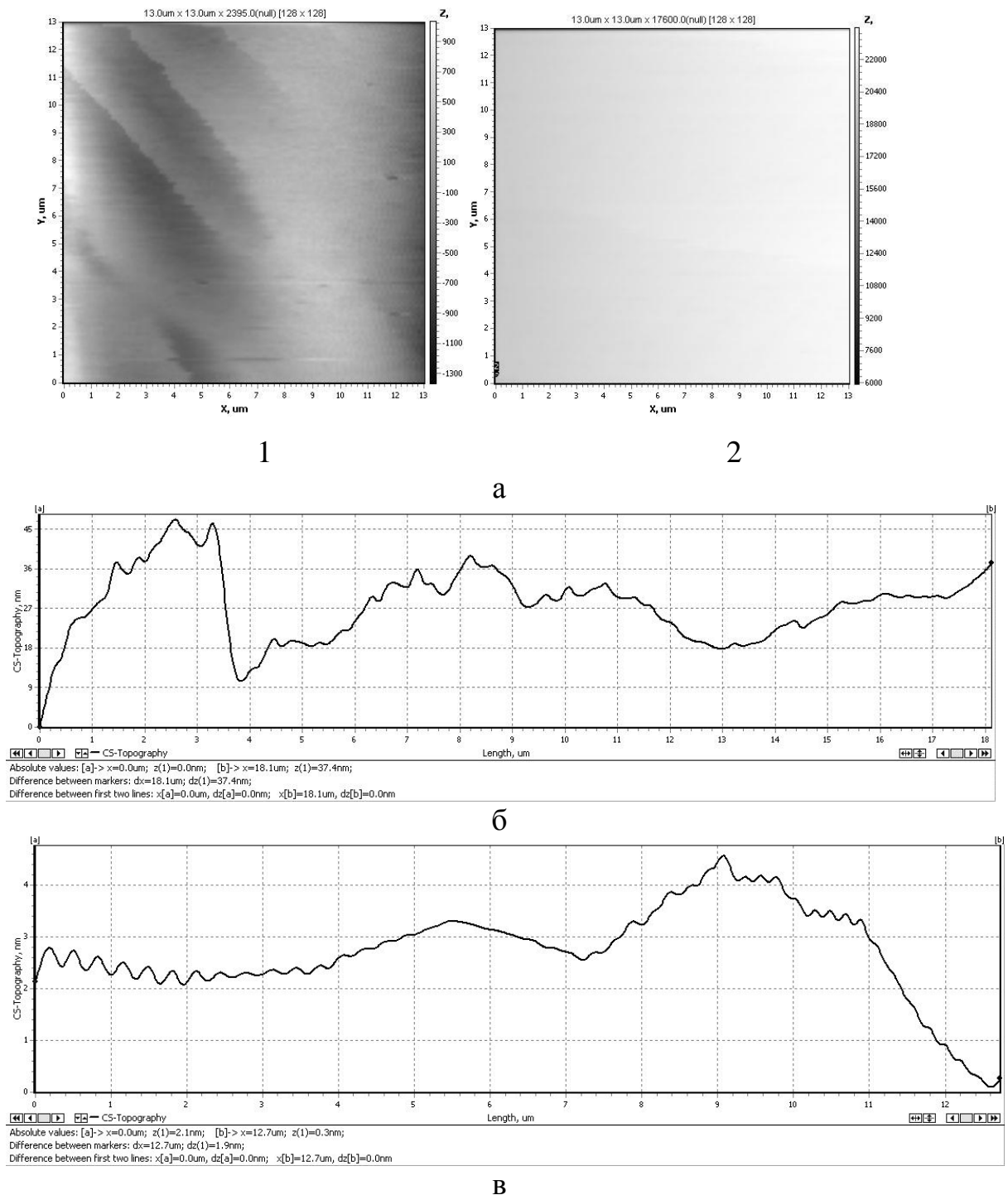


Рисунок 4.1 – Мікрорельєф (а (1 – до ЕПО, 2 – після ЕПО) та профіль вздовж лінії АВ площадки (13×13 мкм) в центральній частині пластини до (б) та після (в) ЕПО

На основі проведених досліджень по визначенню мікрорельєфу поверхні оптичного скла марки К8 були встановлені залежності, які дали змогу

визначити вплив основних технологічних параметрів (питомої потужності та швидкості обробки) електронно-променевої стрічкової обробки на середньоарифметичні мікронерівності  $R_a$  поверхні, рисунок 4.2, 4.3 [164].

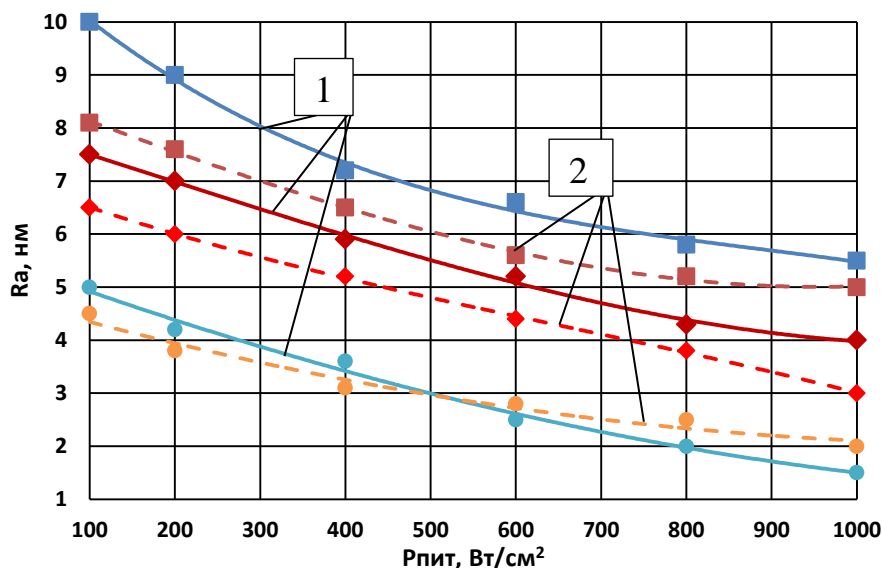


Рисунок 4.2 – Залежність середньоарифметичної шорсткості поверхні  $R_a$  оптичного скла марки К8(1) та ТК14 (2) від питомої потужності потоку  $P_{\text{пит}}$  при різних швидкостях ЕПО (А -  $V = 1,2 \text{ см}/\text{с}$ ; Б -  $2,5$ , С -  $3 \text{ см}/\text{с}$ )

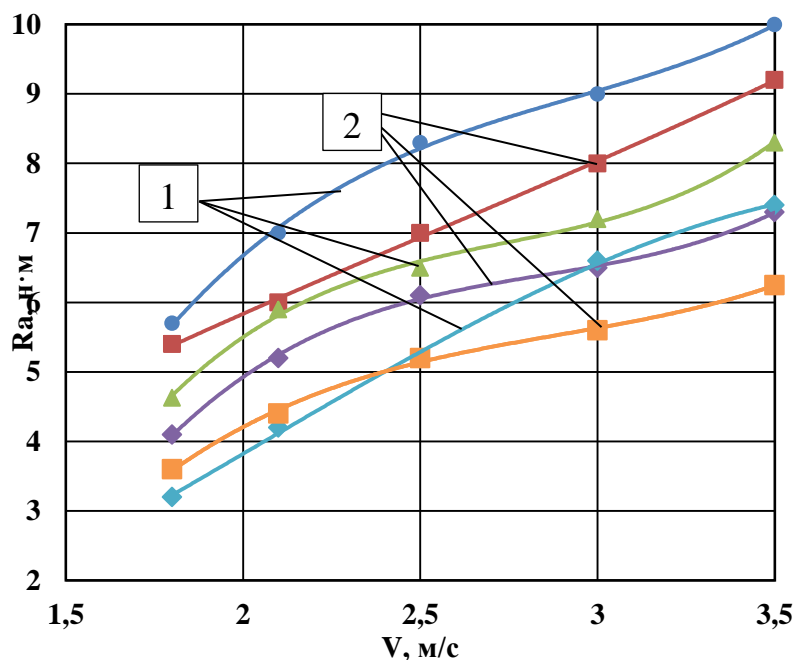


Рисунок 4.3 – Залежність середньоарифметичної шорсткості поверхні  $R_a$  оптичного скла марки К8 (1) та ТК14 (2) від швидкості ЕПО при різних значеннях питомої потужності потоку ( $P_{\text{пит}} = 200 \text{ Вт}/\text{см}^2$ (А);  $400 \text{ Вт}/\text{см}^2$ (Б),  $600 \text{ Вт}/\text{см}^2$ (С))

Як видно з наведених залежностей при збільшенні питомої потужності та зменшенні швидкості переміщення оптичної заготовки в зоні обробки відбувається зниження середньоарифметичної шорсткості поверхні  $R_a$ .

Таким чином, використання низькоенергетичного електронно-променевого оброблення поверхні оптичного скла дозволяє отримувати поверхні з високою рівномірністю. На рисунку 4.4 представлено розподіл мікронерівностей по поверхні скляної пластини обробленої методом багатопрохідного ЕПО.

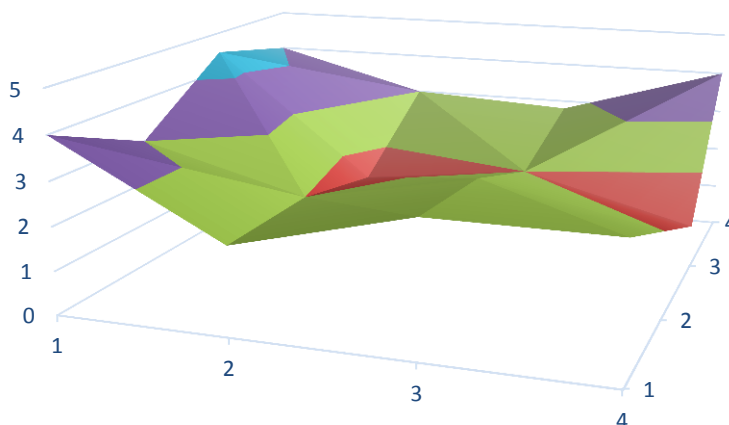
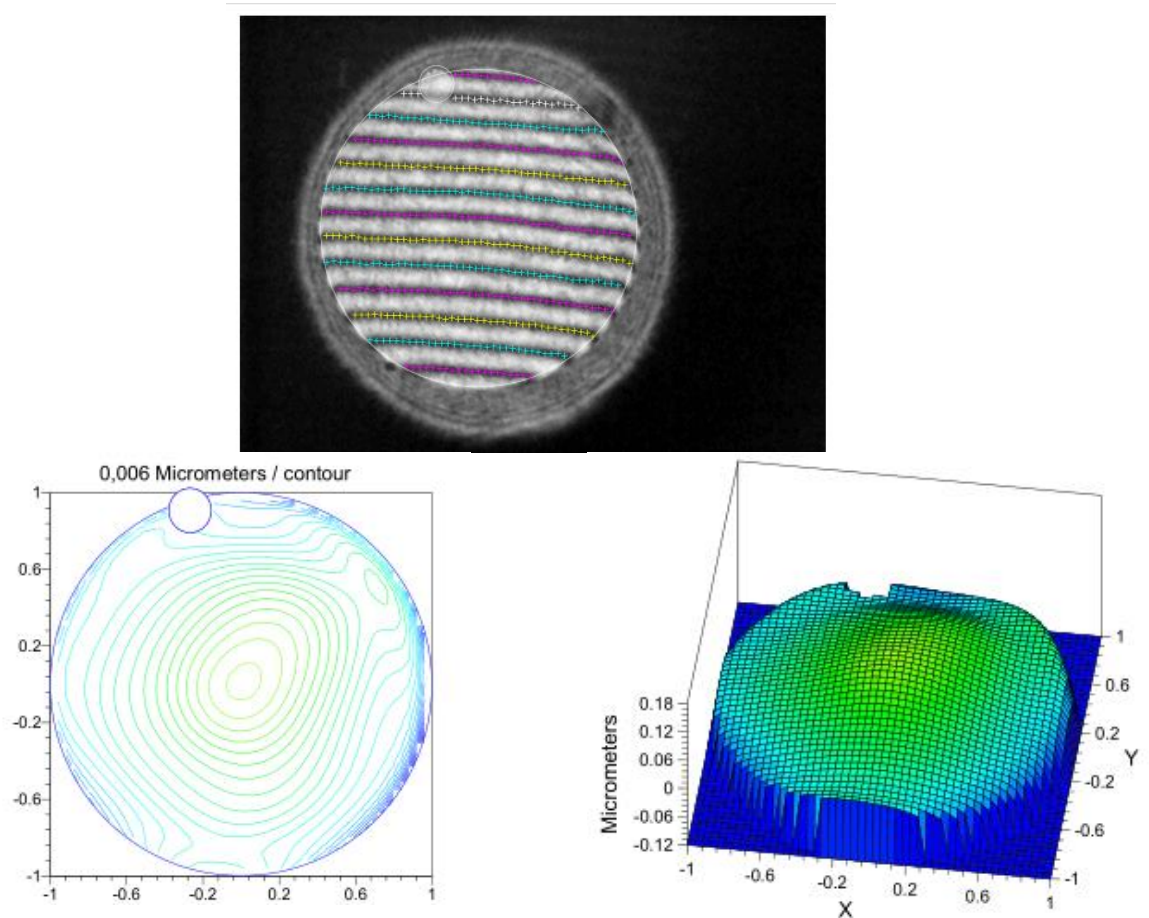


Рисунок 4.4 – Розподілення середньої висоти мікронерівностей по поверхні оптичного скла після ЕПО

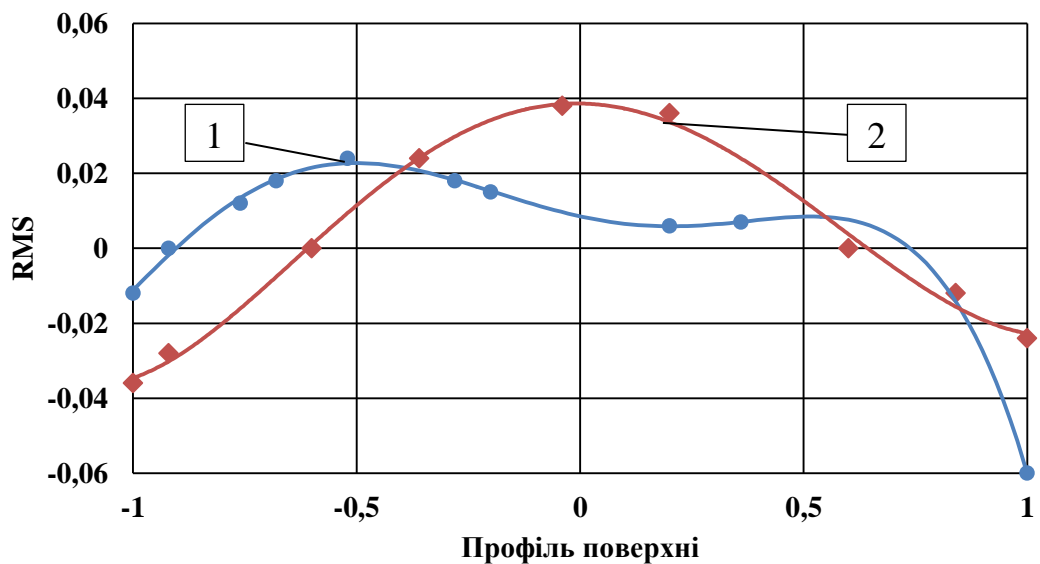
#### 4.1.2. Дослідження поверхні оптичного скла інтерференційним методом

Для встановлення відповідності поверхні оптичного скла стандарту ISO 10110-5:2004, який використовується для визначення допусків на форму поверхні оптичного скла, після низькоенергетичного ЕПО, проводилися дослідження з використанням інтерферометра. В додатку В представлено результати дослідження форми поверхні оптичного скла марки К8 після ЕПО за різних режимів. Відомо, що середньоквадратичне відхилення поверхні оптичного скла до та після ЕПО є найбільш інформативною величиною, яка дає можливість охопити всі типи поверхонь. В результаті проведених досліджень було встановлено, що після низькоенергетичного ЕПО поверхні оптичного скла

відбувається зменшення відхилення поверхні з  $RMS = -0,06...0,06$  до  $RMS = -0,038...0,04$ , рисунок 4.5.



а



б

Рисунок 4.5 – Інтерферограма поверхні оптичних виробів (оптичне скло К8) (а) та середньоквадратичне відхилення поверхні при різних режимах обробки (б) (1-  $P_{\text{пит}} = 600 \text{ Вт/см}^2$ , 2 -  $P_{\text{пит}} = 400 \text{ Вт/см}^2$ ) після ЕПО

#### 4.1.3. Визначення коефіцієнта пропускання оптичного скла після електронно-променевого оброблення

Вимірювання спектрів пропускання для оптичного скла ТК14 проводилися в діапазоні 300...850 нм для 14 зразків ( для проведення порівняльного аналізу було обрано довжину хвилі 330 нм на якій спостерігається найбільша різниця у величині поглинання), а для оптичного скла К8 в діапазоні 400...1100 нм для 8 зразків

Як видно з рисунка 4.6 за різних режимів низькоенергетичного ЕПО відбувається збільшення коефіцієнта пропускання для оптичного скла марки К8 на 1-2,5% в залежності від довжини хвилі.

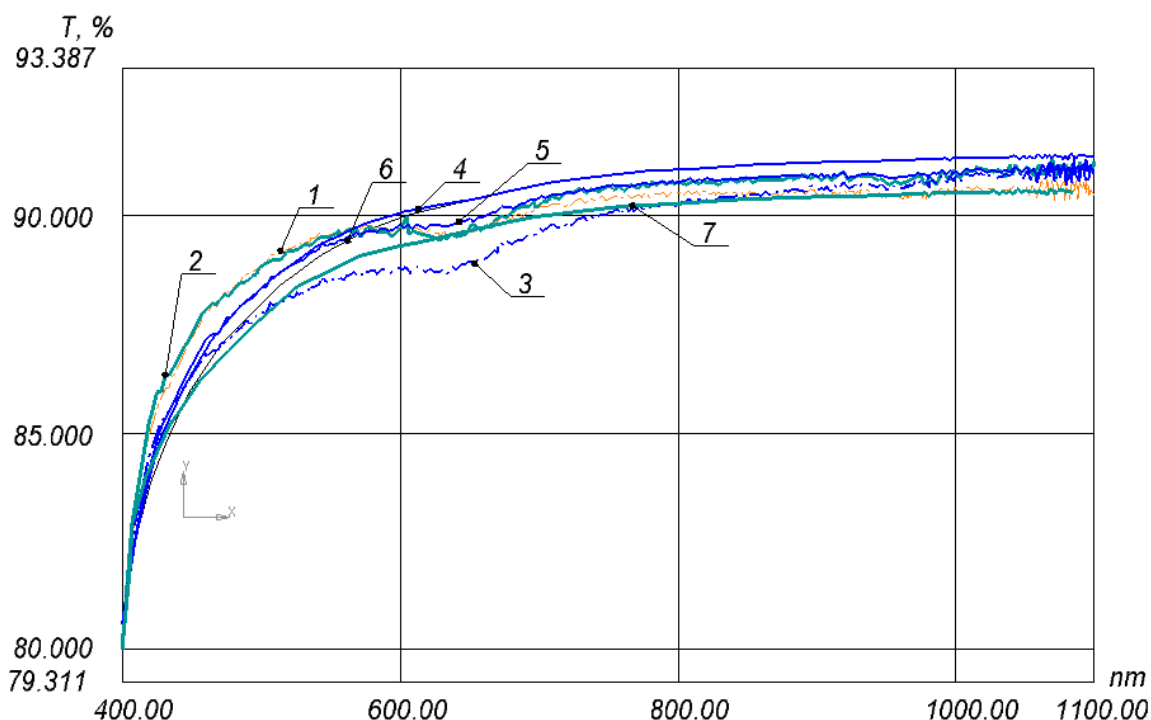


Рисунок 4.6 – Коефіцієнт пропускання для зразків з оптичного скла К8 після стрічкового ЕПО (криві 1-6) та зразка без оброблення (крива 7)

На рисунку 4.7 наведені діаграми коефіцієнтів пропускання для зразків оптичного скла ТК14 після ЕПО. Як видно з рисунку 4.7 в залежності від технологічних режимів ЕПО відбувається максимальне збільшення коефіцієнта пропускання з 57% до 62,2%.



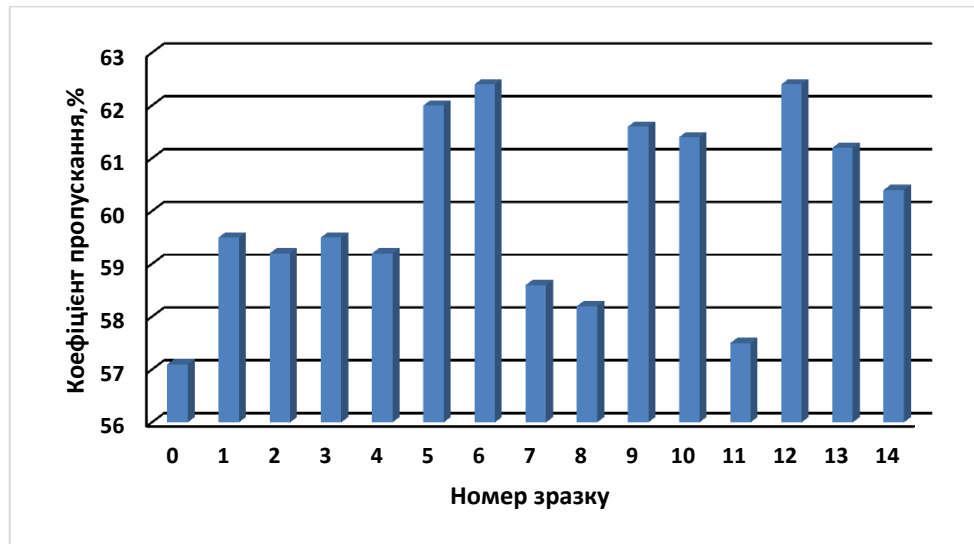


Рисунок 4.7 – Виміряні коефіцієнти пропускання оптичного скла ТК14 після ЕПО (зразки 1-14) та без оброблення (зразок 0)

#### 4.2. Дослідження впливу морської води на поверхню металевих покриттів на оптичному склі К8

Для підтвердження факту підвищення стійкості ОЕ отриманих КЕПО проводилося дослідження стійкості до впливу морської води тонких алюмінієвих покриттів (товщиною 500 нм з точністю  $\pm 5\%$ ). Випробувалася партія з 30 зразків із оптичного скла К8, половина яких отримана з використанням КЕПО (поверхня підкладки попередньо оброблювалася електронним променем з наступними режимами:  $I_{\text{пот}}=175$  мА,  $U_{\text{прис}}=3,0$  кВ,  $U_{\text{мод}}=25$  В,  $V=8$  об/хв., тип обробки – багатопрхідна. Подальше напилення тонких плівок алюмінію відбувалося за наступних технологічних режимів: струм розігріву випарника  $I = 80-90$  А, напруга на випарнику  $U = 8-12$  В. ЕПО тонких плівок алюмінію відбувалося за наступних режимів:  $I_{\text{пот}}=160$  мА,  $U_{\text{прис}}=3,5$ кВ,  $U_{\text{мод}}=25$  В,  $V=8$  об/хв., тип обробки – однопрхідна), а інша – з використанням традиційної технології [165].

Дослідження по визначенню впливу морської води на зміну мікрогеометрії, об'єктів що досліджуються проводилися відповідно до ОСТ 19033-71. Зразки для проведення досліджень було поділено на 5 груп (в

кожній групі по 6 зразків для дослідження (три зразки отриманих за базовою технологією і, відповідно, 3 зразки отриманих КЕПО). Для визначення впливу морської води на якісні характеристики ОЕ, чотири групи зразків витримувалися в морській воді за температури  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  з солонуватістю 10,8‰ (місце забору – м.Маріуполь, 2010 рік) на протязі часу, відповідно, 1 хв; 15 хв; 60 хв; 900 хв. П'ята група зразків використовувалася для проведення досліджень в умовах агресивного середовища морської води з одночасним впливом високочастотної механічної дії (УЗ-коливання: 30 кГц; 45 Вт) протягом 15 хв. [165]. Для проведення досліджень по визначенню мікрорельєфу поверхні зразків використані розроблені в роботі методики та рекомендації (див.п.2.3). В результаті проведених досліджень було встановлено, що тонкі плівки алюмінію отримані за базовою та комбінованою технологіями з подальшою витримкою в морській воді протягом 1 хв; 15 хв та 60 хв, мають відповідно наступні залишкові мікрошорсткості: 16,8 нм; 17,3 нм; 17,8 нм – для зразків отриманих за базовою технологією та 15,3 нм; 17,1 нм; 18,0 нм – для отриманих КЕПО. Отримані значення залишкових мікрошорсткостей не перевищують гранично допустимі значення (25 нм) і становлять 15...17 нм (рисунок 4.8, зразки 1, 2) [165]. Для зразків із четвертої групи, залишкові мікрошорсткості тонких алюмінієвих плівок виготовлених за базовою технологією і витриманих в морській воді протягом 900 хв становить 27,9 нм, а з використанням КЕПО – 22,3 нм[165]. Також було встановлено, що тонкі плівки алюмінію, які були одержані за базовою технологією, є більш неоднорідні та мають певну кількість нанодфектів, що призводить до пришвидшеної руйнації таких покриттів в порівнянні зі зразками, які були отримані КЕПО [165]. При дослідженні п'ятої групи зразків було встановлено, що залишкові мікрошорсткості поверхні тонкої плівки алюмінію, яка виготовлена за базовою технологією збільшуються з 15...17 нм до 110...125 нм, а сама поверхня стає неоднорідною та містить значну кількість нанодфектів [165]. В той же час залишкові мікрошорсткості поверхні тонкої алюмінієвої плівки, яка виготовлена з використанням КЕПО залишаються на рівні 15...18 нм, рисунок 4.9.

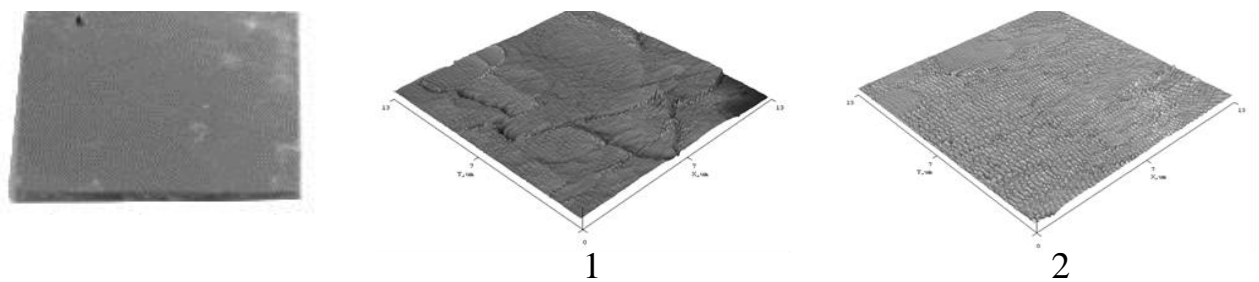


Рисунок 4.8 – Зовнішній вигляд (а), топограма (б) та профілограма в) поверхні (площадка  $13 \times 13$  мкм) пластини з оптичного скла марки К8 ( $20 \times 20$  мм) з тонкою плівкою Al (базова технологія) (1) та КЕПО (2) та подальшою витримкою в морській воді на протязі 60 хвилин [165]

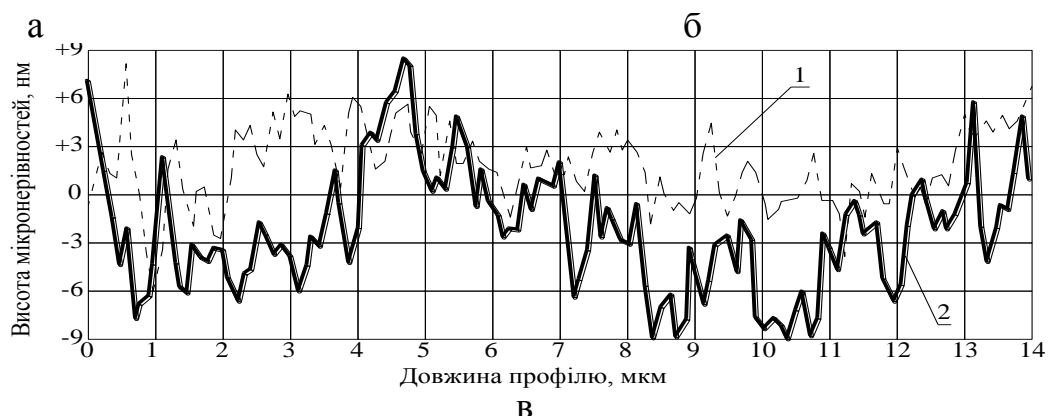
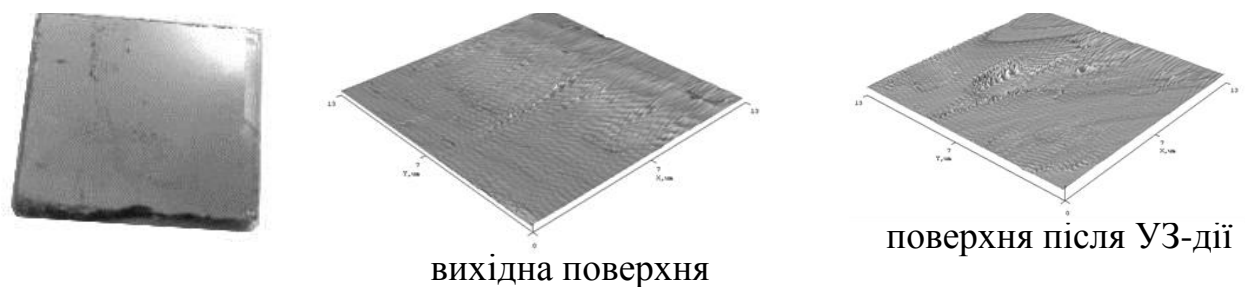


Рисунок 4.9 – Зовнішній вигляд (а), топограма (б) та профілографа (в) поверхні (площадка  $13 \times 13$  мкм) пластини з оптичного скла марки К8 ( $20 \times 20$  мм) з тонким покриттям Al (КЕПО) до (1) та після (2) УЗ-дії протягом 15 хвилин в середовищі морської води [165]

#### 4.3. Визначення мікрошорсткості поверхні тонких покриттів отриманих комбінованим електронно-променевим обробленням

Тонкі плівки срібла були отримані з використанням технології КЕПО. Поверхня підкладинки попередньо оброблювалася низькоенергетичним потоком електронів стрічкової форми за наступними режимами: струм електронного потоку  $I_{\text{пот}}=175$  мА, прискорююча напруга  $U_{\text{прис}}=3,5$  кВ, напруга на модуляторі  $U_{\text{мод}}=35$  В, швидкість обробки  $V=10$  об/хв., тип обробки – багатопрохідна. Подальше напилення тонких плівок срібла відбувалося за наступних технологічних режимів: струм розігріву випарника  $I = 115-125$  А, напруга на випарнику  $U = 20-22$  В. ЕПО тонких плівок срібла відбувалося за наступних режимів: струм електронного потоку  $I_{\text{пот}}=140$  мА, прискорююча напруга  $U_{\text{прис}}=3,0$  кВ, напруга на модуляторі  $U_{\text{мод}}=35$  В, швидкість обробки  $V=10$  об/хв., тип обробки – однопрохідна[166].

В результаті дослідження мікрошорсткості встановлено, що тонкі плівки срібла, які отримуються на поверхні оптичного скла К8 з використанням базової технології, мають неоднорідності, містять мікроефекти поверхні (крапки, тріщини тощо), та мають підвищену поруватість [166] (рисунок 4.10 а).

Визначена середньостатистична шорсткість поверхні таких тонких плівок, яка становить 50-75 нм. В той же час, тонкі покриття срібла на оптичному склі отримані з використанням КЕПО мають залишкові мікронерівності 35-50 нм, зниження мікронерівностей пов'язане з оплавленням тонкого покриття і його частковим вплавленням в поверхневий шар оптичного скла. В результаті такої обробки підвищується адгезійна міцність покриття (до 4–5 класу), рисунок 4.10 б. Поверхня тонких плівок срібла, які отриманні з використанням КЕПО, має більш однорідну структуру та позбавлена від мікроефектів, які притаманні тонким плівкам отриманим за базовою технологією[166].

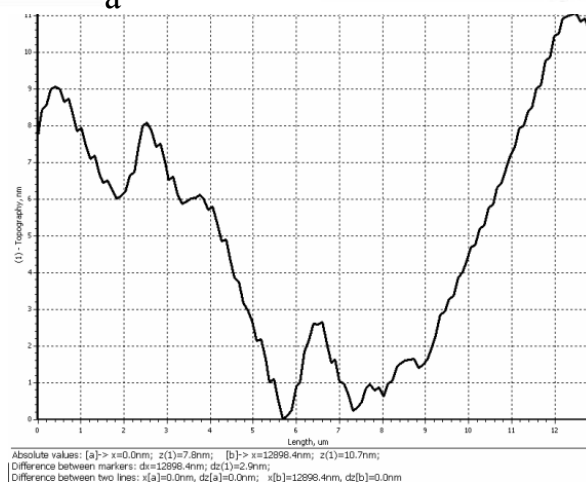
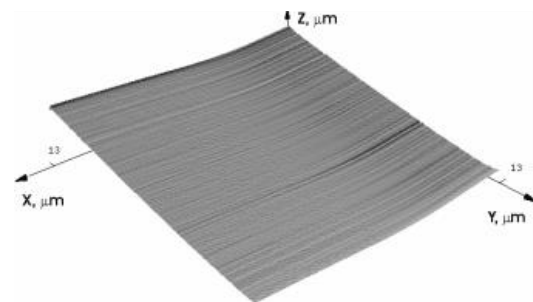
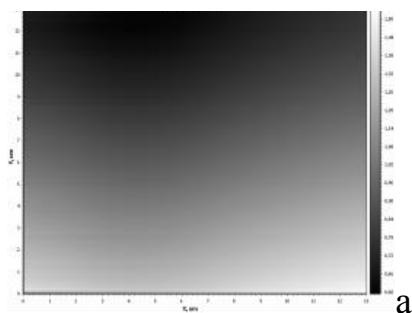
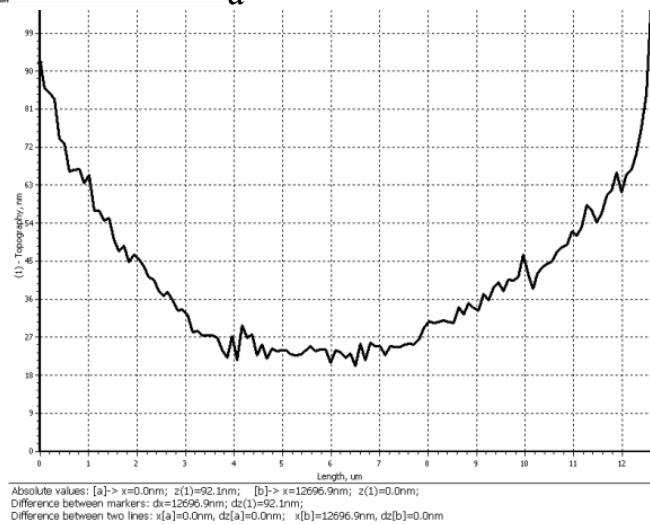
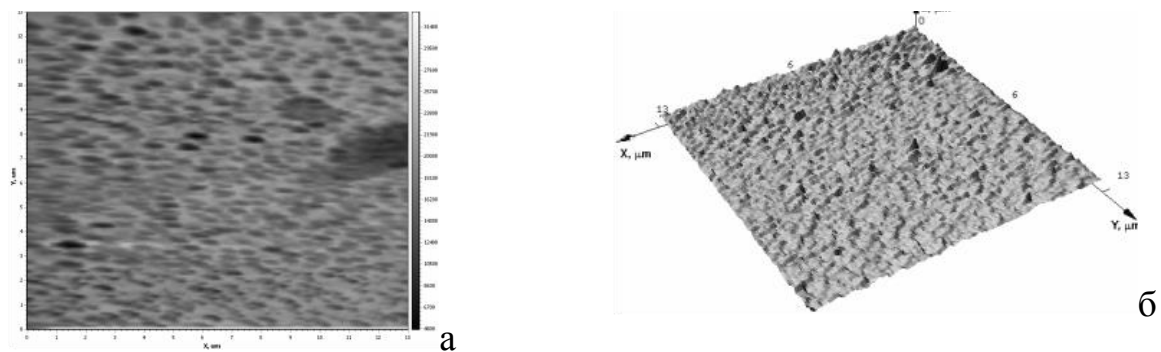


Рисунок 4.10 – Топограма (а), мікрорельєф (б) площадки поверхні тонкої плівки (Ag) на ділянці 13х13 мкм на оптичному склі марки К8 і профіль вздовж лінії 1 – 2 (в) 1 – отримана за базовою технологією 2 – отримана з використанням КЕПО [166].

#### 4.4. Визначення міцності тонких плівок отриманих комбінованим електронно-променевим обробленням

В якості показника міцності обрано внутрішні термомеханічні напруження тонких плівок (на прикладі плівок алюмінію) отриманих КЕПО. Поверхня підкладинки попередньо оброблювалася низькоенергетичним потоком електронів стрічкової форми за наступними режимами: струм електронного потоку  $I_{\text{пот}}=175$  мА, прискорююча напруга  $U_{\text{прис}}=3,5$  кВ, напруга на модуляторі  $U_{\text{мод}}=35$ В, швидкість обробки  $V=10$  об/хв., тип обробки – багато прохідна [167].

Подальше напилення плівок відбувалося за наступних технологічних режимів: струм розігріву випарника  $I = 80-100$  А, напруга на випарнику  $U = 10-15$  В.

Модифікація тонких плівок алюмінію ЕПО відбувалася за наступних режимів: струм електронного потоку  $I_{\text{пот}}=140$  мА, прискорююча напруга  $U_{\text{прис}}=3,0$  кВ, напруга на модуляторі  $U_{\text{мод}}=35$ В, швидкість обробки складала  $V=10$  об/хв., тип обробки – однопрохідна.

Аналіз карт розподілення внутрішніх напружень (рисунок 4.11 а, б) показує, що тонкі плівки, які отримані за базовою технологією мають більшу кількість зон з підвищеними механічними напруженнями, в порівнянні з тонкими плівками одержаними комбінованою технологією, що може бути пов'язане з релаксаційними процесами, які відбуваються в покриттях при дії на них електронного потоку [167].

В той же час, як видно з графіку залежності внутрішніх напружень (рисунок 4.11в) в поверхневому шарі для плівки алюмінію отриманої за базовою технологією спостерігається різке підвищення внутрішніх напружень по глибині, яке відповідає відповідній товщині покриття. Для плівки отриманої з використанням комбінованої технології також спостерігається різка зміна внутрішніх напружень на глибині порядку 22-24 нм, а також невелике збільшення внутрішніх напружень в поверхні зразка. Отже, збільшення

глибини залягання границі критичних внутрішніх напружень може свідчити про «занурення» напиленої тонкої плівки в матеріал основи.

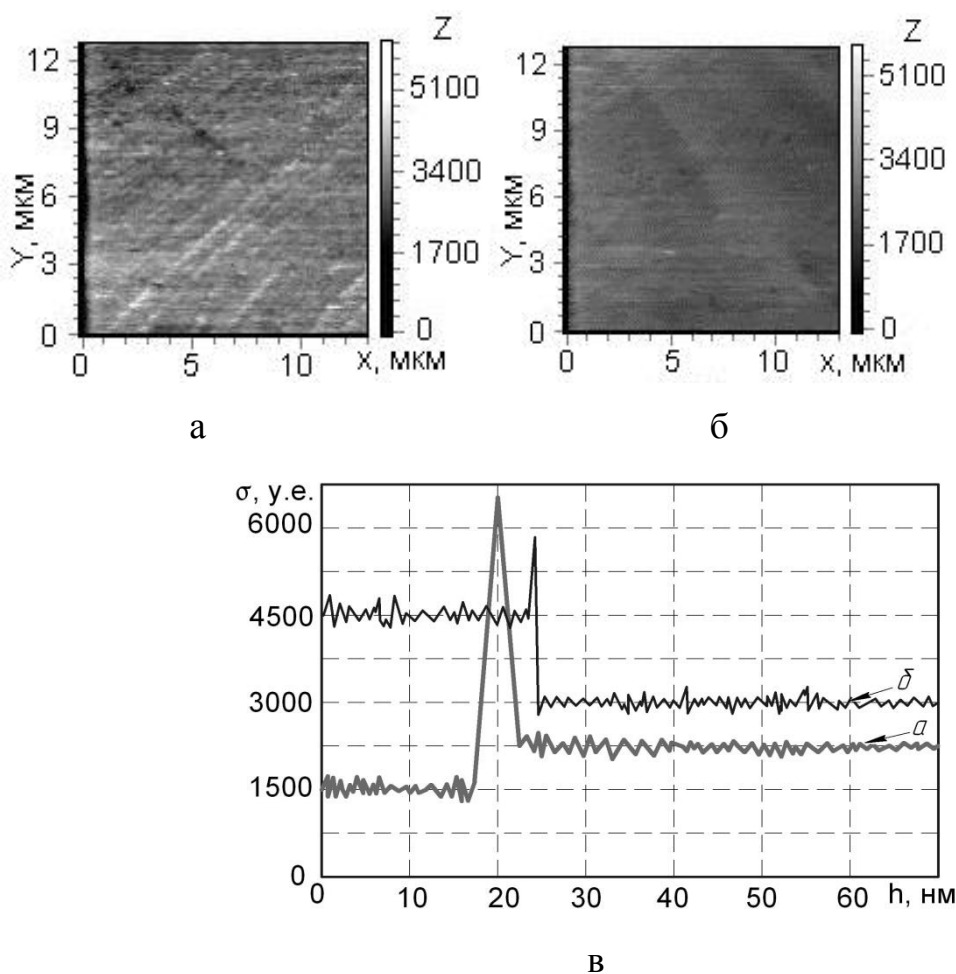


Рисунок 4.11 – Карта розподілення внутрішніх напружень в тонких плівках алюмінію: отриманих за базовою технологією (а) і отриманих з використанням комбінованої технології (б), графіки залежності внутрішніх напружень в поверхневому шарі зразка (в) [167]

#### 4.5. Комплексні дослідження тонких покриттів золота отриманих на поверхні оптичного скла марки ТК14

Пластини з оптичного скла марки ТК14 були оброблені низькоенергетичним потоком електронів з двох сторін (два цикли обробки). ЕПО зразків здійснювалась при наступних технологічних режимах: прискорююча напруга 3-3,5 кВ, струм електронного потоку 160...220 мА, напруга на модуляторі 25-35 В. Осадження тонких плівок золота здійснювалося

термічним випаровуванням у вакуумі. Дослідження з визначення характеристик тонких плівок золота осаджених на тонкі пластини з оптичного скла, які оброблені з двох сторін, з використанням ЕПО проводилось співробітниками інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України.

Для визначення основних характеристик поверхні зразків використовувався метод АСМ (рисунок 4.12).

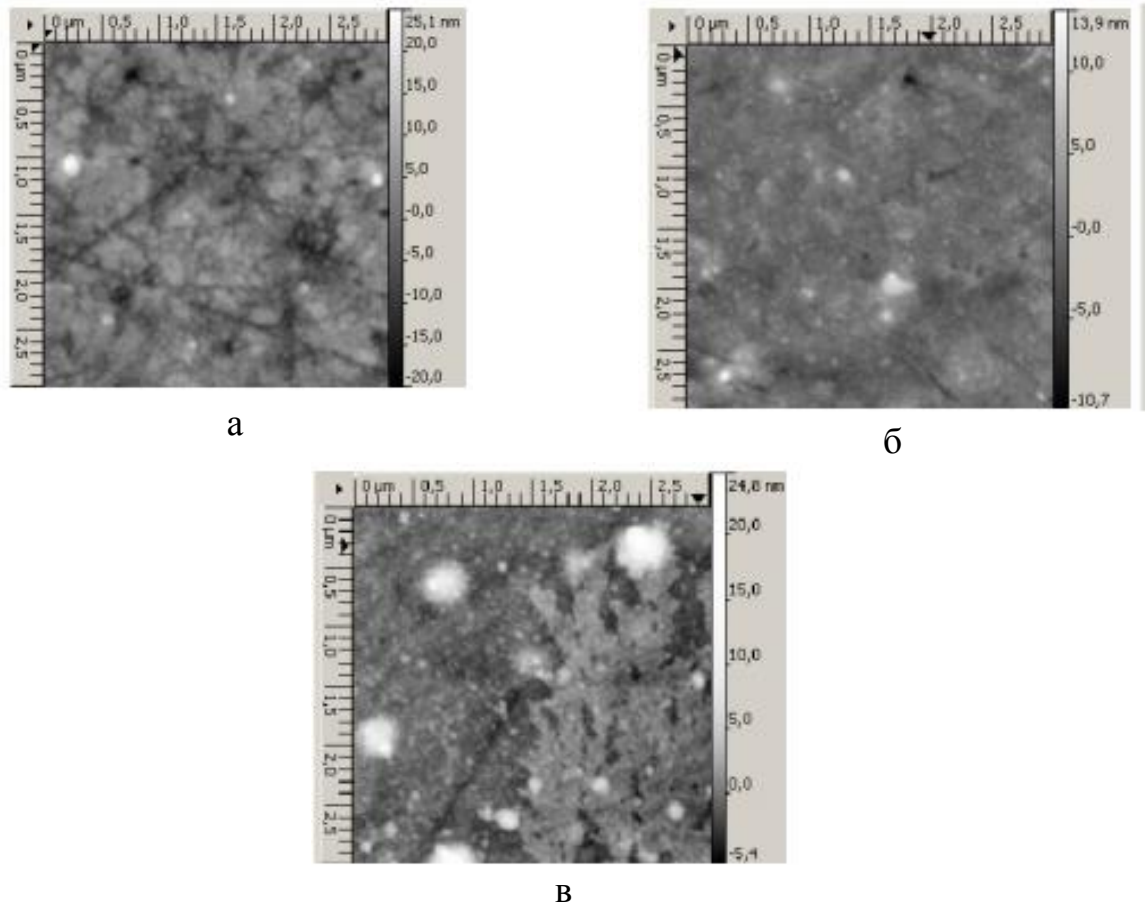
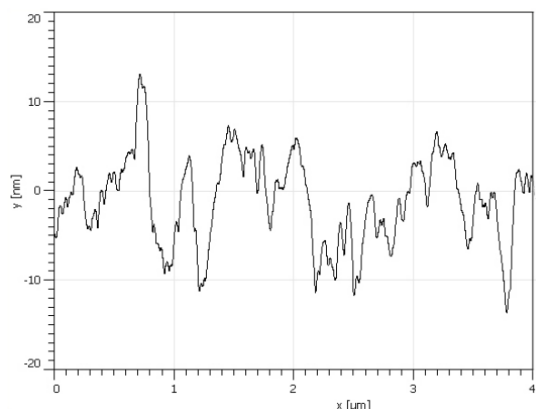


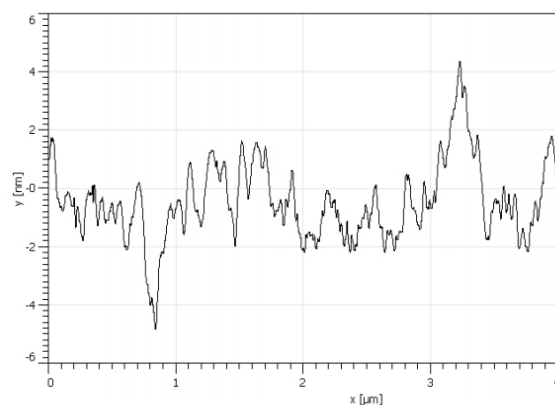
Рисунок 4.12 – Зображення поверхонь зразків: без ЕПО – зразок 3 (а), та з обробкою при різних значеннях питомої потужності 27,84 Вт/мм<sup>2</sup> – зразок 1 (б), 36,62 Вт/мм<sup>2</sup> – зразок 2 (в) [168]

В результаті проведених досліджень встановлено, що поверхня оптичних елементів після ЕПО стає більш однорідною (рисунок 4.13 б) за величинами розкиду висот нерівностей відносно базової лінії, ніж до обробки (рисунок 4.13 а).





а



б.

Рисунок 4.13 – Профілі поперечного перерізу поверхонь зразків, що досліджуються: без ЕПО - зразок 3 (а) та з ЕПО питомою потужністю 36,62 Вт/мм<sup>2</sup> - зразок 2 (б) [168]

Як показав аналіз топології поверхні оптичних елементів після ЕПО, поверхні скляної підкладки, відбувається зменшення мікросорсткості поверхні осадженої на неї тонкої плівки золота. Середньоквадратична мікросорсткість поверхні Rms зменшилась у 2 рази з 4,67 нм до 2,32 нм при питомій потужності 27,84 Вт/мм<sup>2</sup> та у 3 рази з 4,67 нм до 1,64 нм при питомій потужності 36,62 Вт/мм<sup>2</sup>. [168]

Густина тонких плівок золота збільшилась з 17,2 до 19,3 г/см<sup>3</sup> після електронно-променевого оброблення підкладок.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань [168]

Зразки	Питома потужність Вт/мм <sup>2</sup>	Метод ACM			Метод XRR			
		Rms, нм	Ra, нм	Rz, нм	Rq Au- Air, нм	Rq SiO- Au, нм	Густина плівки, г/см <sup>3</sup>	Товщина плівки, нм
1	27,84	2,32	0,66	3,94	2,0	1,2	19,3	43,00
2	36,62	1,64	0,53	3,42	1,3	0,8	19,2	43,46
3	0	4,67	1,21	7,41	2,6	0,5	17,4	48±4
4	0	4,32	1,36	7,79	2,6	0,5	17,2	48±4

Застосування ЕПО для модифікування поверхні підкладок чутливих

елементів ППР-приладів підвищує їх чутливість

Рефрактометричні характеристики ( рисунок 4.14), представляють собою залежності коефіцієнта відбиття від кута падіння світла  $\Theta$  на границю середовищ скло-повітря, між якими була розташована тонка плівка золота. [180]

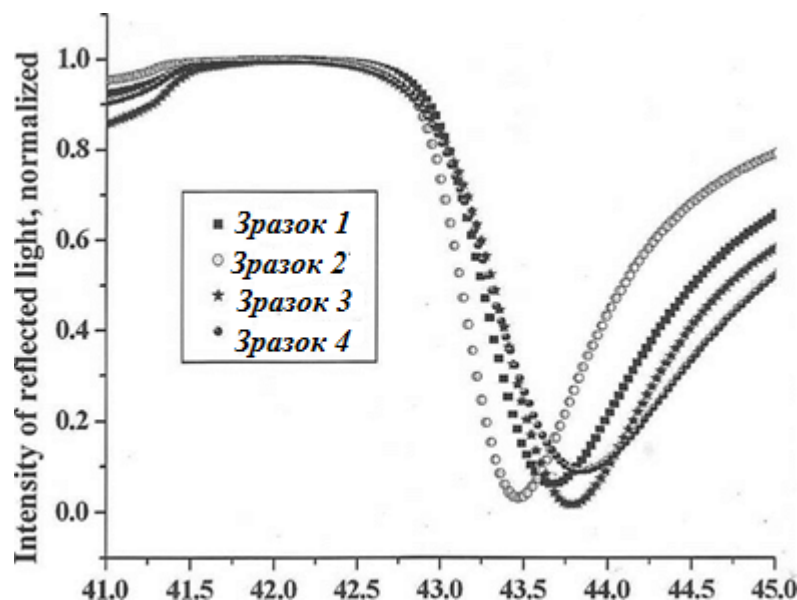


Рисунок 4.14 – Рефрактометричні характеристики зразків з різною питомою потужністю ЕПО скляної підкладки 27,84 Вт/мм<sup>2</sup> - зразок 1; 36,62 Вт/мм<sup>2</sup> – зразок 2; без ЕПО - зразки 3,4 [180]

Електронно-променеве оброблення поверхні підкладок чутливих елементів ППР-приладів призводить до звуження їх рефрактометричних характеристик майже в 2 рази (з 0,453 град. до 0,867) та підвищує чутливість приладу в 1,7 рази (з 1,425 град<sup>-1</sup>. до 2,396 град<sup>-1</sup>) внаслідок зменшення втрат при розповсюдженні поверхневих плазмонів вздовж границі метал-повітря [168].

Спектральні залежності показника заломлення  $n$  та коефіцієнта екстинції  $k$  в діапазоні довжин хвин від 300 до 800 нм наведені на рисунку 4.15.

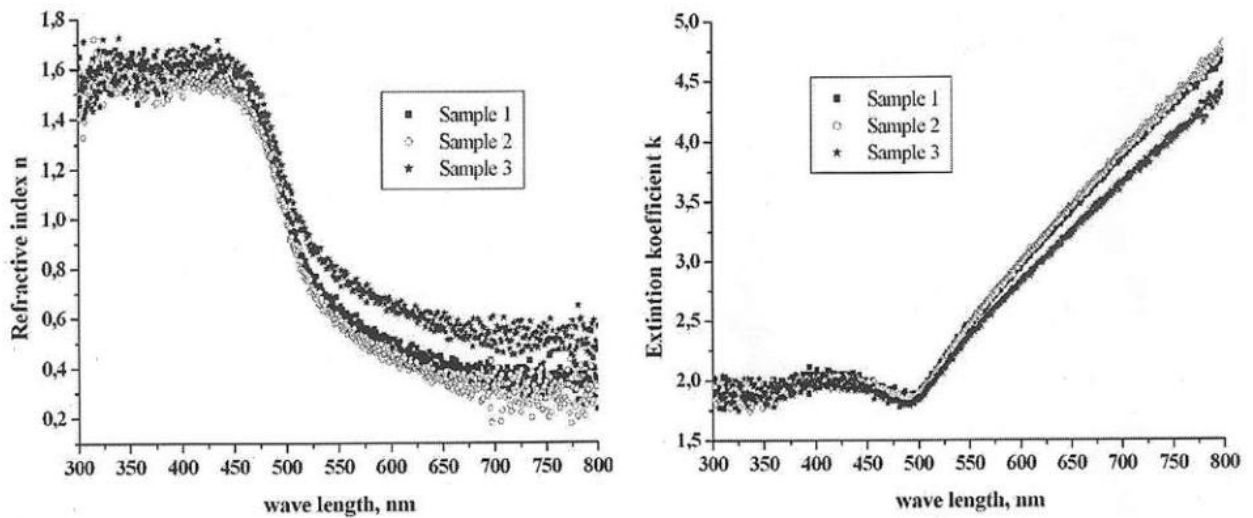


Рисунок 4.15 – Розраховані спектральні залежності показника заломлення  $n$  (а) та коефіцієнта екстинції  $k$  (б) для зразків: без ЕПО – зразок 3, з ЕПО різної питомої потужності  $27,84 \text{ Вт/мм}^2$  – зразок 1,  $36,62 \text{ Вт/мм}^2$  – зразок 2 [168]

#### 4.6. Використання комбінованого електронно-променевого оброблення для виготовлення інших функціональних елементів

##### 4.6.1. Покращення механічних характеристик наноінструментарію для скануючої зондової мікроскопії

Підтвердження ефективності та перспективності запропонованого в дисертаційному дослідженні комбінованого методу ЕПО проводилося в процесі дослідження результатів модифікування поверхні наноінструментарію. В якості об'єкту модифікування виступали конічні кремнієві зонди для скануючої зондової мікроскопії (СЗМ), які застосовуються для проведення досліджень геометричних та механічних характеристик поверхонь твердих матеріалів. Для підвищення зносостійкості кремнієвих зондів на їх робочу поверхню за запропонованою технологією наносилися високооднорідні тонкі плівки вуглецю ( $\sim 5\text{--}8 \text{ нм}$ ) з подальшою їх модифікацією електронним потоком [169].

Після проведення поверхневої модифікації наноінструментарією СЗМ вуглецевим покриттям проводилися наступні випробування.

Так, на рисунку 4.16 представлені результати проведених досліджень стану поверхні кремнієвого зонду для АСМ після комбінованого електронно-променевого оброблення [169].

Як видно з рисунку 4.16, вихідна поверхня зонду перед модифікуванням має більш розвинений мікрорельєф. Також відбувається зменшення пор, які утворюються в процесі виготовлення цих зондів. Визначення мікротвердості отриманого покриття здійснювалося за методикою, описаною в роботі [151]. Достовірність отриманих результатів дослідження підтверджувалася мікроіндентуванням за методом Вікерса на приладі DuroScan-10/20. Результати проведених досліджень представлені на рисунку 4.17.

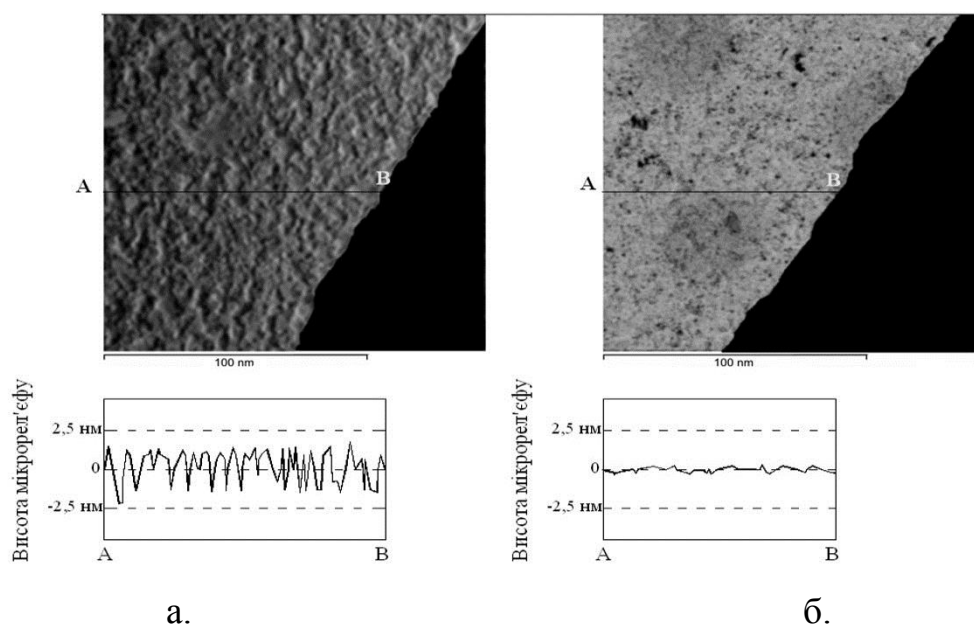


Рисунок 4.16 – Ділянка поверхні кремнієвого зонда Ultrasharp CSC38 та його мікропрофіль вздовж лінії А–В (електронний мікроскоп JEOL JSM-6700F, Японія): поверхня до обробки (а) та відновлена КЕПО (б) [169]

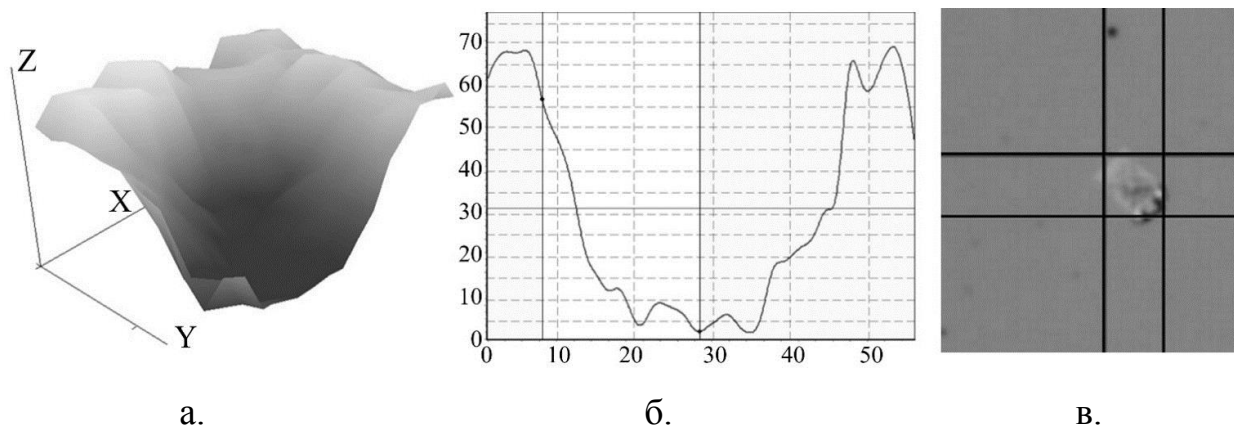


Рисунок 4.17 – Ділянка поверхні кремнієвої пластини ( $13 \times 13$  мкм) з відбитком наноіндентора (метод АСМ) (а); профіль відбитка кремнієвого зонда АСМ (б); відбиток алмазної пірамідки (метод мікроіндентування) (в) [169]

Значення мікротвердості кремнієвої пластини виміряне методом АСМ становить  $11,62 \pm 1,97$  ГПа, а значення отримане з використанням метода мікроіндентування за Вікерсом складає –  $12,11 \pm 1,33$  ГПа. Отже похибка в вимірюванні не перевищує 5% [169].

Для визначення зносостійкості використовувався метод склерометрії. В якості зразків для дослідження були використані тонкі (50 нм) плівки  $\text{SiO}_2$ , дослідження проводили при навантаженні на індентор –  $5 \cdot 10^{-4}$  Н. За результатами дослідження встановлено, що коефіцієнт зносостійкості при використанні модифікованого зонду склав 25,7 (для порівняння: коефіцієнт зносостійкості алмазу  $k = 100$ ), тоді як при використанні кремнієвого зонду цей коефіцієнт становить 23,1, що пов'язано з більш швидким зношенням кремнієвого зонду без модифікування, а ніж модифікованого зонду. Таким чином, модифікування кремнієвих зондів СЗМ тонким вуглецевим покриттям за розробленою технологією КЕПО дозволило зменшити субшорсткість поверхні наноінструментарію, підвищити на 10–15% їх мікротвердість та зносостійкість, що збільшує термін експлуатації на 45-55% [169].

#### 4.6.2. Підвищення функціональної ефективності виробів із п'єзоелектричних керамік

В процесі застосування розробленої в роботі технології, на поверхню виробів із п'єзоелектричних керамік марки ЦТС-19 осаджувалася тонка плівка срібла (електрод) товщиною  $h=30\ldots40$  нм (струм випарника  $I=18$  А, час осадження  $t=1,8\ldots3,2$  с). Далі, за тих же режимів проводилося отримання впорядкованих структур через з'ємну молибденову маску з їх подальшим ЕПО ( $I_{\text{пот}}=160$  мА,  $U_{\text{прис}} = 3,0$  кВ,  $U_{\text{мод}}=35$  В,  $V=16$  об/хв., тип обробки – однопрохідна) [170].

На рисунку 4.18 представлено результати дослідження отриманої поверхні п'єзокераміки ( топограму та мікропрофіль).

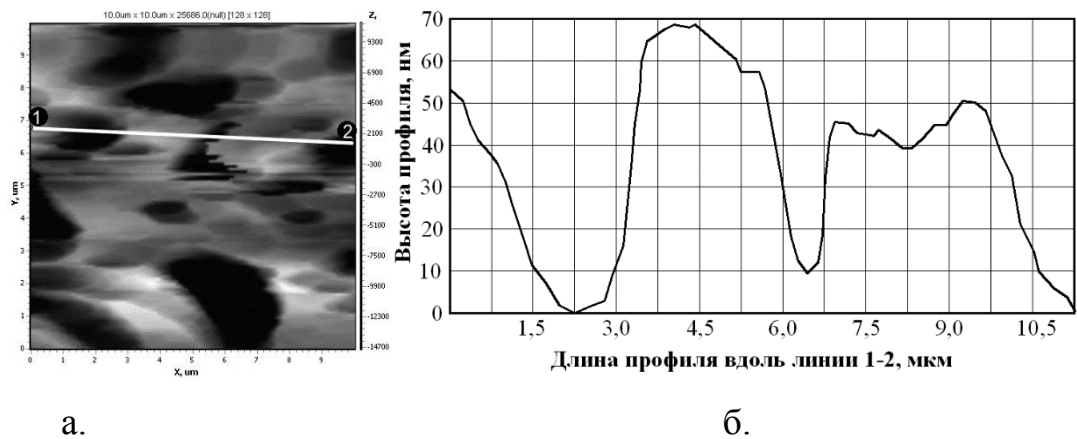


Рисунок 4.18 – Топограма (а) та мікропрофіль (б) тонкого однорідного покриття сформованого на поверхні п'єзокераміки ЦТС-19 [170]

В результаті досліджень встановлено, що застосування комбінованого ЕПО до п'єзокераміки марки ЦТС-19 дозволяють підвищити добротність останньої з  $20,5\ldots24$  до  $35\ldots38$ , зменшити поруватість поверхні на  $3 \ldots 5$  % та її поверхневий електроопір з  $0,5\ldots0,6$  Ом до  $0,09\ldots0,13$  Ом [170].

#### 4.7. Використання результатів дисертаційного дослідження в промисловості та в навчальному процесі закладів вищої освіти України

Для широкого використання в промисловості рекомендуються наступні результати дисертаційного дослідження:

- система для зондування електронного потоку яка дозволяє проводити діагностику низькоенергетичного електронного потоку стрічкової форми безпосередньо підчас КЕПО оптичних елементів;
- система автоматизованого керування процесом КЕПО, яка створена на базі промислової вакуумної установки типу УВН-71-П, до складу якої входять системи керування кварцовою піччю, блоком живлення ЕПГ Пірса;
- методика КЕПО оптичних елементів, яка дасть змогу підвищити якісні характеристики оптичних елементів.
- методика оцінки якості поверхні оптичних деталей методом атомно-силової мікроскопії, що дозволяє оперативно проводити неруйнівний контроль якості поверхні оптичного скла до і після ЕПО (наявність мікро- та нанодефектів, мікрошорсткість, механічну міцність) та досліджувати поверхню тонкої плівки, осадженої на такій поверхні (залишкова мікрошорсткість, адгезійна міцність, зносостійкість) в одному вимірювальному циклі.
- математична модель, яка дозволяє визначати оптимальні режими оброблення при отриманні заданого розподілу температури на поверхні оптичного елементу.

Окремі результати дисертаційної роботи були впроваджені у вітчизняну та закордонну промисловість (додаток Г), а саме: оптичні елементи створенні з використанням технології КЕПО використовуються на ТДВ «Микротестмашины» (м. Гомель, Білорусь) для елементів систем атомно-силового мікроскопу в якості дзеркал системи фотодетектування і дозволяють в 1,5-2 рази підвищити точність і відтворюваність позиціювання лазерного випромінення.

Основні результати дисертаційного дослідження Коваленка Ю.І. застосовуються у навчальному процесі Черкаського державного технологічного університету при викладанні курсу дисципліни «Теоретичні основи теплотехніки», «Основи математичного моделювання систем», «Основи теплотехніки».

#### 4.8 Висновок до розділу

В результаті проведених досліджень встановлено, що в порівнянні з вихідною поверхнею мікрошорсткість якої становить  $R_a = 30...100$  нм (скло К8),  $R_a = 40...70$  нм (скло ТК14) після ЕПО мікрошорсткість складає  $R_a = 1,5...10,0$  нм (скло К8) та  $R_a = 2,0...8,1$  нм (скло ТК14). Встановлено залежності середньоарифметичної шорсткості поверхні від технологічних режимів оброблення (швидкості електронного оброблення та питомої потужності).

Встановлено, що ЕПО призводить до збільшення коефіцієнта пропускання оптичного скла(для скла К8 на 1-2,5% ( $\lambda=400-1000$  нм), для скла ТК14 з 57 до 62,2% ( $\lambda=330$  нм)).

Встановлено, після ЕПО поверхні оптичного скла відбувається зменшення відхилення поверхні з  $RMS = -0,06...0,06$  до  $RMS = -0,038...0,04$ .

Встановлено, що поверхня тонких плівок срібла, які отриманні з використанням КЕПО, має більш однорідну структуру та позбавлена від мікроефектів, які притаманні тонким плівкам отриманим за базовою технологією (середньостатистична шорсткість поверхні зменшилась з 50-75 нм до 35–50 нм).

В результаті проведених досліджень було встановлено, що тонкі плівки алюмінію отриманні за базовою та комбінованою технологіями з подальшою витримкою в морській воді протягом 1 хв; 15 хв та 60 хв, 900 хв. мають відповідно наступні залишкові мікрошорсткості: 16,8 нм; 17,3 нм; 17,8 нм, 27,9 нм – для зразків отриманих за базовою технологією та 15,3 нм; 17,1 нм; 18,0 нм, 22.3 нм – отриманих КЕПО. При впливі УЗ-коливань було встановлено, що



залишкові мікрошорсткості поверхні тонкої плівки алюмінію, яка виготовлена за базовою технологією збільшуються з 15...17 нм до 110...125 нм, а сама поверхня стає неоднорідною та містить значну кількість нанодефектів. В той же час залишкові мікрошорсткості поверхні тонкої алюмінієвої плівки, яка виготовлена з використанням КЕПО залишаються на рівні 15...18 нм

Встановлено, що тонкі плівки, які отримані за базовою технологією мають більшу кількість зон з підвищеними механічними напруженнями, в порівнянні з тонкими плівками одержаними комбінованою технологією, що може бути пов'язане з релаксаційними процесами, які відбуваються в покриттях при дії на них електронного потоку.

Встановлено, що після ЕПО поверхні скляної підкладинки відбувається зменшення мікрошорсткості поверхні осадженої на неї тонкої плівки золота ( $R_{ms}$  зменшилась у 2 рази з 4,67 нм до 2,32 нм при питомій потужності 27,84 Вт/мм<sup>2</sup> та у 3 рази з 4,67 нм до 1,64 нм при питомій потужності 36,62 Вт/мм<sup>2</sup>) також підвищується чутливість елементів ППР-приладів. Електронно-променева обробка поверхні підкладинок чутливих елементів ППР-приладів призвела до звуження їх рефрактометричних характеристик майже в 2 рази (з 0,453 град. до 0,867) та підвищилась чутливість приладу в 1,7 рази (з 1,425 град<sup>-1</sup>. до 2,396 град<sup>-1</sup>) внаслідок зменшення втрат при розповсюдженні поверхневих плазмонів вздовж границі метал-повітря.

Встановлено, що модифікування кремнієвих зондів СЗМ тонким вуглецевим покриттям за розробленою технологією КЕПО дозволило зменшити субшорсткість поверхні наноінструментарію, підвищити на 10–15% їх мікротвердість та зносостійкість, що збільшує термін їхньої експлуатації на 45–55%.

В результаті досліджень встановлено, що застосування комбінованого ЕПО до п'єзокераміки марки ЦТС-19 дозволяють підвищити добротність останньої з 20,5...24 до 35...38, а також зменшити поруватість поверхні на 3 ... 5 % та її поверхневий електроопір з 0,5...0,6 Ом до 0,09...0,13 Ом.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення і нове розв'язання наукового завдання з вдосконалення технології та обладнання для комбінованого електронно-променевого оброблення оптичних елементів, що відповідає меті та задачам дослідження і відображено в таких результатах:

1. Модернізоване технологічне обладнання для комбінованого електронно-променевого оброблення оптичних елементів шляхом удосконалення вузлів та блоків з резистивного нанесення покриття, електронно-променевого оброблення та контролю параметрів оброблення, що дозволило реалізувати в одному технологічному циклі осадження тонких плівок та їх подальше модифікування стрічковим електронним променем, що забезпечить отримання високих якісних характеристик оптичних елементів.

2. Розроблена автоматизована система гнучкого керування режимами електронно-променевого оброблення дозволяє безпосередньо в процесі робочого циклу керувати питомою потужністю ( $P_{\text{ном}} = (0 \dots 1000) \pm 0,02 \text{ Вт/см}^2$ ) та змінювати її розподіл за рахунок зміни напруги на модуляторі, що призводить до підвищення точності (на 5...8%) та повторюваності (у 2,2...2,5 рази) результатів оброблення.

3. Удосконалена математична модель енергетичної взаємодії стрічкового електронного потоку з поверхнею оптичного матеріалу з покриттям, яка дозволяє врахувати ефект тонкої плівки з більшою теплопровідністю ніж у основного матеріалу та розрахувати розподіл теплових полів в оптичному елементі, що забезпечує швидке та високоточне (відносна похибка не перевищує 10-15%) визначення робочих параметрів режимів якісного комбінованого електронно-променевого оброблення.

4. Розроблена та впроваджена системи зондування низькоенергетичного електронного потоку стрічкової форми дозволяє у режимі реального часу визначити та корегувати енергетичні параметри електронного потоку (коефіцієнт ефективності, розподіл щільності електронного потоку) шляхом

зміни робочих параметрів електронно-променевої гармати Пірса (напруга на модуляторі, прискорююча напруга, струм розжарення), що гарантовано підвищує стабільність електронного потоку і, як наслідок, якісні характеристики оптичних елементів.

5. Дослідження оптичних елементів після комбінованого електронно-променевого оброблення показали:

- зменшення мікрошорсткості поверхні до  $R_a = 1,5 \dots 10,0$  нм (скло К8) та, відповідно,  $R_a = 2,0 \dots 8,1$  нм (скло ТК14);

- збільшення коефіцієнта пропускання оптичного скла К8 на 1-2,5% ( $\lambda=400-1000$  нм), для скла ТК14 з 57 до 62,2% ( $\lambda=330$  нм);

- зменшення відхилення поверхні з  $RMS = -0,06 \dots 0,06$  до  $RMS = -0,038 \dots 0,04$ ;

- покращення поверхні тонких плівок (збільшення однорідності структури та позбавлена мікродефектів, зменшення середньостатистичної шорсткості поверхні до 35–50 нм).

6. Основні результати дисертаційної роботи знайшли практичне застосування на вітчизняних (ПМПП «Фотоніка Плюс», ПрАТ «Укрп'єзо», ТОВ НВФ "ОНТФ", (м. Черкаси), а оптичні елементи отримані з використанням даної технології, що використовуються на ТДВ «Микротестмашины» (м. Гомель, Білорусь) в якості дзеркал системи фотодетектування атомно-силового мікроскопу дозволяють в 1,5-2 рази підвищити точність і відтворюваність позиціонування лазерного випромінювання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Окатов М.А. Справочник технолога-оптика / М.А. Окатов, М.А. Антонов, А. Байгожин. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.
2. Бубис И.Я. Справочник технолога-оптика: Справочник / И.Я. Бубис, В.А.Вейденбах, И.И. Духопел и др. Под общ. ред. С.М. Кузнецова и М.А. Окатова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 414 с.
3. ОСТ 3-1901-95 Покрытия оптических деталей. Типы, основные параметры и методы контроля.
4. ISO 9211-1-4:2010 Оптика и оптические приборы. Оптические покрытия. Часть 1-4.
5. Шиліна О.П. Вакуумно-конденсаційне напилювання покрить. Навчальний посібник / О.П. Шиліна, В.І. Савуляк, А.Ю. Осадчук. – Вінниця: ВНТ, 2007. – 96 с.
6. Данилин Б.С. Получение тонкопленочных элементов микросхем / Б.С Данилин. – М.: Энергия, 1977. – 136 с.
7. Поут Дж. Тонкие пленки Взаимная диффузия и реакции / Под ред. Поута Дж., Ту К., Мейера Дж. и др. Пер. с англ. под ред. В.Ф.Киселева, В.В.Поспелова. – Москва: Мир, 1982. – 576 с.
8. Ершов А.В. Многослойные оптические покрытия. Проектирование, материалы, особенности технологии получения методом электронно-лучевого испарения. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые материалы электроники и оптоэлектроники для информационно-телекоммуникационных систем» / А.В. Ершов, А.И. Машин. – Нижний Новгород, 2006. – 99 с.
9. Борило Л.П. Тонкопленочные неорганические наносистемы / Л.П. Борил. Под ред. д-ра техн. наук, проф. В.В. Козика. – Томск: Томский государственный университет, 2012. – 134 с.

10. Маскаева Л. Н. Технология тонких пленок и покрытий: учеб. пособие / Л. Н. Маскаева, Е. А. Федорова, В. Ф. Марков. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 236 с.
11. Гайнутдинов И. С. Оценка качества поверхности подложек для нанесения интерференционных покрытий / И. С. Гайнутдинов, Е. А. Несмелов, А. Н. Борисов, А. В. Михайлов // Оптический журнал. – 2002. – № 12. – С. 68-75.
12. Яценко І.В. Вдосконалення технології електронної обробки та якості оптичних виробів: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.07 / Яценко Ірина В'ячеславівна / – Черкаський держ. технологічний ун-т. – Черкаси – 2006. – С. 262 .
13. Канашевич Г.В. Технологічні основи керування якістю поверхневого шару оптичних матеріалів при електронно-променевому мікрообробленні: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.07 / Канашевич Георгій Вікторович / – Черкаський держ. технологічний ун-т. – Черкаси –2009. – С. 336.
14. Костржицкий А. И. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме / А. И. Костржицкий, В. Ф. Карпов, М. П. Кабанченко и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 176 с.
15. Калинушкін Є.П. Тонкоплівкові матеріали та технології їх одержання. Навч. посібник / Є.П. Калинушкін, Н.М. Федоркова, Ю.П. Синиціна та ін. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2009. –175 с.
16. Ануфриев Л.П. Технология интегральной электроники: учебное пособие по дисциплине «Конструирование и технология изделий интегральной электроники» для студентов специальностей “Проектирование и производство РЭС”, ”Электронно-оптические системы и технологии” / Л.П. Ануфриев, С.В. Бордусов, Л.И. Гурский [и др.]. Под общ. ред. А.П. Достанко и Л.И. Гурского. – Минск: Интегралполиграф, 2009. – 379 с.
17. Гольдаде В.А. Методы получения тонких пленок: практическое пособие / В.А.Гольдаде, Н.Н. Федосенко. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2015. – 41 с.

18. Антоненко С.В. Технология тонких пленок. Учебное пособие / С.В. Антоненко. – М.: МИФИ, 2008. – 104 с.
19. Хасс Г. Физика тонких пленок. Современное состояние исследований и технические применения. Том 1,2, 3 / Г. Хасс, Р.Э. Тун. Под ред. Г. Хасса и Р.Э. Туна, пер. с англ. – Москва: Мир, 1967.
20. Метфессель С. Тонкие плёнки, их изготовление и измерение / С. Метфессель. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. – 272 с.
21. Антонюк В. С. Покриття у приладобудуванні : монографія / В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, Ю. Ю. Бондаренко та ін. / - Київ : НТУУ «КПІ». Вид-во «Політехніка». 2016. – 360 с.
22. Петухов В.Ю. Ионно-лучевые методы получения тонких пленок. Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета. Издание 2-е, исправленное и дополненное / В.Ю. Петухов, Г.Г. Гумаров. – Казань, 2010. – 87 с.
23. Минайчев В.Е. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В10 кн.: Учебное пособие для ПТУ. – Кн.6 Нанесение пленок в вакууме / В.Е. Минайчев. – М.: Высш. шк., 1989. – 110 с.
24. Менушенков А.П. Физические основы лазерной технологии. Учебное пособие / А.П. Менушенков, В.Н. Неволин, В.Н. Петровский. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 212 с.
25. Котликов Е.Н. Проектирование, изготовление и исследование интерференционных покрытий. Учебное пособие / Е.Н. Котликов, Г.А.Варфоломеев, Н.П. Лавровская, А.Н. Тропин, Е.В. Хонинева. – СПб.: ГУАП, 2009. – 188 с.
26. Козерук А. С. Технология оптического приборостроения: учебное пособие для студентов специальностей 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы» и 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты» / А. С. Козерук. – Минск: БНТУ, 2016. – 504 с.

27. Иванов А. Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование / А. Иванов, А. Б. Смирнов // Журнал наноиндустрия. – 2012. – №6. – С. 28-34.
28. Моряков О.С. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 кн. Кн.7. Элионная обработка. Учебное пособие для ПТУ / О.С.Моряков. – М.: Высш.шк., 1990. – 128 с.
29. Ковалев Л.К. Методы нанесения тонких пленок в вакууме / Л.К. Ковалев, Ю.В. Панфилов // Справочник. Инженерный журнал. – 1997. – №3. – С. 20- 28.
30. Панфилов Ю.В. Нанесение тонких пленок в вакууме / Ю.В. Панфилов // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – №3. – С. 76-80.
31. Панфилов Ю.В. Машиностроение. Энциклопедия Технология, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III – 8 / Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.Г. Блохин и др. Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 2000. – 744 с.
32. Саханский Ю.В. Проблема нанесения тонких плёнок в изделиях электроники и слоистых устройствах инициирования взрывчатых веществ / Ю.В. Саханский, Н.Г. Макаров // Труды молодых учёных. – Владикавказ: Издательство «Терек», 2014. – №1. – С. 44-49.
33. Горбатюк С. М. Оптимизация процессов напыления меди и хрома методом термического испарения в вакууме / С. М. Горбатюк, И. Г. Морозова, А. Н. Пашков // Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – 2014. – Вип. 150. – С. 51-54.
34. Исаев М.В. Лазерное напыление в технологии создания жидкокристаллических устройств / М.В. Исаев, А.П. Онохов // Оптический журнал. – 2001. – Т. 68, № 9. – С. 83-88.

35. Воротынцев В.М. Базовые технологии микро- и нанoeлектроники. Учебное пособие / В.М. Воротынцев, В.Д. Скупов. – Москва: Проспект, 2017. – 520 с.
36. Ануфриев Л.П. Технология интегральной электроники: учебное пособие по дисциплине «Конструирование и технология изделий интегральной электроники» для студентов специальностей “Проектирование и производство РЭС”, “Электронно-оптические системы и технологии” / Л.П. Ануфриев, С.В. Бордусов, Л.И. Гурский [и др.]. – Минск: Интегралполиграф, 2009. – 379 с.
37. Введенский В.Д. Вакуумная технология оптического приборостроения. / В.Д Введенский, В. П. Рязанкин. – М.: Заочный институт ЦПВНТО приборостроителей им. С.И. Вавилова, 1988. – 68 с.
38. Берлин Е.В. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е.В Берлин, С.А. Двинин, Л.А.Сейдман. – Москва: Техносфер, 2007. – 176 с.
39. Готра З. Ю.Технология микроэлектронных устройств / З. Ю. Готра . — М.: Радио и связь, 1991.— 528 с.
40. Чопра К. Тонкопленочные солнечные элементы / К . Чопра, С. Дас Перевод с англ. с сокращениями. – М.: Мир, 1986. – 435с.
41. Чопра К.Л. Электрические явления в тонких пленках / К.Л. Чопра. М.: Мир, 1972. – 435 с.
42. Ройх И.Л. Нанесение защитных покрытий в вакууме / И.Л. Ройх, Л.Н. Колтунова, С.Н. Федосов. – М.: Машиностроение, 1976. – 369 с.
43. Гладких Н.Т Поверхностные явления и фазовые превращения в конденсированных пленках / Н.Т. Гладких, С.В. Дукаров, А.П. Крышталь, и др. – Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразин, 2004. – 276с.
44. Палатник Л. С. Механизм образования и субструктура конденсированных пленок. Монография / Л. С. Палатник, М.Я. Фукс, В.М. Косевич. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1972. – 320 с.



45. Кудинов В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992.- 432 с.
46. Смолин В.К. Особенности применения алюминиевой металлизации в интегральных схемах / В.К. Смолин // Микроэлектроника. – 2004. – Т 33, №1. – С. 10-16.
47. Холлэнд Л. Нанесение тонких пленок в вакууме. / Л. Холлэнд. Перевод с англ. Н.В. Васильченко. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 608 с.
48. Майссела Л. Технологии тонких пленок (справочник). / Л. Майссела Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. Нью-Йорк 1970. Пер. с англ. Под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. Т.1. – М.: Сов. радио, 1977. – 664 с.
49. Майссела Л. Технологии тонких пленок (справочник). / Л. Майссела Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнг. Нью-Йорк 1970. Пер. с англ. Под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. Т.2. – М.: Сов. радио, 1977. – 768 с
50. Фураман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия / Ш.А. Фураман. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1977. – 264 с.
51. Ковалев Л.К. Методы нанесения тонких пленок в вакууме / Л.К. Ковалев, Ю.В. Панфилов // Справочник. Инженерный журнал. – 1997. – № 3 – С. 20-28.
52. Канашевич Г.В. Спеціальні методи обробки оптичного скла Г.В. Канашевич., Д.І. Котельніков, В.А. Ващенко та ін. Під ред. професора Д.І. Котельникова. – Чернігів: Сіверська думка, 2001. – 215 с.
53. Муранова Г.А. Свойства пленок полученных распылением мишеней ионным пучком / Г.А. Муранова, Н.Н. Смирнов // Оптический журнал. – 2001. – Т. 68, № 4. – С. 53-59.
54. Канунникова О.М. Тонкие планки меди, золота и алюминия на силикатном стекле / О.М. Канунникова, О.Ю. Гончаров, Ф.З. Гильмутдинов., С.Ф. Ломаева // Стекло и керамика. – 2002. – №10. – С. 29-31.

55. Барвинок В.А. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления / В.А. Барвинок, В.И. Богданович. – М.: Машиностроение, 1999. – 309 с.
56. Хансперджер Р. Интегральная оптика: Теория и технология / Р. Хансперджер. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 384 с.
57. Броудай И. Физические основы микротехнологии: Пер. с англ. / И. Броудай, Дж. Мерей. – М.: Мир, 1985. – 496 с.
58. Френк Д.М. Физика и технология полупроводниковых пленок. / Д.М. Френк, М.А. Галушак, Л.И. Межиловская. – Львов: Вища шк., 1988. – 152с.
59. Комник Ю.Ф. Физика металлических пленок. Размерные и структурные эффекты. / Ю.Ф. Комник. – М.: Атомиздат, 1979. – 264 с.
60. Шавва М.А. Повышение качества оптических поверхностей элементов приборов алмазным шлифованием, на сверхточных станках Дис... канд. техн. наук: 05.02.07 / Шавва Мария Александровна / – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2017. – 200с.
61. Чесноков Д. В. Научные и технические аспекты развития методов лазерной полировки стекла / Д. В. Чесноков, Е. В. Шапран // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. СибОптика-2016: сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – с. 76-81.
62. Панфилов Ю.В. Применение ионно-плазменных методов для формирования гладких оптических поверхностей / Ю.В.Панфилов, С.Б. Нестеров, С.Б. Симакин, М.Э. Яковлев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 10. – С. 15-18.
63. Шрам А. А. Электротехнический комплекс поверхностной модификации стекла потоками низкотемпературной плазмы / А. А. Шрам // Ползуновский вестник. – Барнаул. – 2013. – № 4 – 2. – С. 210-215.

64. В. П. Вейко Лазерно-индуцированная структурно-фазовая модификация стеклообразных материалов / В.П. Вейко, Э.И. Агеев, А. В. Колобов, Дж. Томинага // Известия вузов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 6. – С.7-31.
65. Бесогонов В. В. Уменьшение шероховатости поверхности ситалловой подложки до наноразмерных значений / В.В. Бесогонов, И.Н. Скворцова // Изв. ВУЗОВ. Приборостроение. – 2009. – Т. 52, № 9 – С.73-76.
66. Стогний А.И. Ионно-лучевое полирование наноразмерного рельефа поверхности оптических материалов / А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий, О.М. Стукалов // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т.28, вып. 1. – С. 39-48.
67. Ковивчак В.С. Плавление тонкой пленки алюминия на диэлектрической подложке при воздействии мощного ионного пучка / В.С. Ковивчак, Т.В. Панова, Р.Б. Бурлаков // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, вып. 6. – С.98-103.
68. Файзрахманов И.А. Влияние ионной обработки отражающих алюминиевых покрытий на их микрорельеф и светорассеяние / И.А. Файзрахманов, Ю.П. Стрельников, И.Б. Хайбуллин // Оптический журнал. – апрель 2004. – Т. 71, №4. – С.46-49.
69. Мифтахов С. Ионная полировка оптических материалов аморфного строения в условиях ВЧ-разряда пониженного давления / С. Мифтахов, Э. Ф. Вознесенский, И. Ш. Абдуллин, Л. Гатауллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 23. – С. 73-74.
70. Трофимов А. В. Формирование функционального микрорельефа на поверхности оптических материалов аморфного строения в условиях ВЧ-разряда пониженного давления / А. В. Трофимов, Э. Ф. Вознесенский, И. Ш. Абдуллин, М. Алкин // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 23. – С. 85-86.
71. Комаровская В.М. Оптимизация режимов ионной обработки поверхности неметаллических материалов / В.М. Комаровская, С.А. Иващенко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – №03. – с. 23-27

72. Ветошкин В.М. Влияние обработки низкоэнергетичными ионами на шероховатость подложек из ситалла, поликора и кварца / В.М. Ветошкин, П.Н. Крылов // Поверхность. Рентгеновские синхронные и нейтронные исследования. – 2010. – №10. – С. 57-59.

73. Ромашевский С. А. Фемтосекундная лазерная технология обработки твердотельных материалов: создание функциональных поверхностей и селективная модификация наноразмерных слоев / С. А. Ромашевский, С. И. Ашитков, М. Б. Агранат // Теплофизика высоких температур. – 2018. – Т. 56, № 4. – С. 609-630.

74. Верхогляд А. Г. Особенности модификации кварцевого стекла импульсами пикосекундного лазера / А.Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, А. В. Солдатенко, М. Ф. Ступак // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017»: сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск: СГУГиТ, 2017. – с.136-141.

75. Завьялова М.А. Поверхностная модификация кварцевого стекла импульсами пикосекундного лазера / М.А. Завьялова // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, №6. – С. 863-870.

76. Яковлев С.А. Лазерно-индуцированная модификация поверхности тонких пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ : фазовые изменения и формирование периодических структур / С.А. Яковлев, А.В. Анкудинов, Ю.В. Воробьев, М.М. Воронов, С.А. Козюхин, Б.Т. Мелех, А.Б. Певцов // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т 52, вып. 6. – С. 664-670.

77. Шершнев Е.Б. Исследование лазерной полировки кварцевого стекла / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, А.Е. Шершнев // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – № 4 (25). – С. 45-49.

78. Заколдаев Р. А. Лазерная модификация структуры пористых стекол: физико-технологические основы и применения Дис... канд. техн. наук: 05.27.03 / Заколдаев Роман Алексеевич /федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский

национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» - Санкт-Петербург 2018 – с. 94.

79. Стяпшин В. М. Лазерная модификация фоточувствительной серебро-палладиевой резистивной плёнки / В.М. Стяпшин, Г.М. Михеев, Р.Г. Зонов, А.С. Саушин // *Нанотехника*. — 2013. — № 3. — С. 11–14.

80. Булгакова Н.М. Лазерно-индуцированная модификация прозрачных кристаллов и стекол / Н.М. Булгакова, Р. Стоян, А. Розенфельд // *Квантовая электроника*. — 2010. — Т. 40, № 11. — С. 966-985.

81. Hildebrand J. Advanced analysis of laser beam polishing of quartz glass surfaces / J. Hildebrand, K. Hecht, J. Bliedtner, H. Müller // *Physics Procedia*. — 2012. — № 39. — P. 277-285.

82. Hildebrand J. Laser Beam Polishing of Quartz Glass Surfaces / J. Hildebrand, K. Hecht, J. Bliedtner, H. Müller // *Physics Procedia*. — 2011. — № 12. — P. 452-461.

83. Вейко В.П. Исследование структуры тонких металлических пленок после воздействия фемтосекундных лазерных импульсов / В.П. Вейко, А.В. Баранов, М.В. Ярчук, А.И. Иванов, К.В. Богданов // *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*. — 2010. — № 5 (69). — С. 21-25.

84. Костюк Г. К. Локальная модификация оптических свойств пористого стекла низкоинтенсивным лазерным излучением Дис. ... канд. техн. наук: 05.27.03 / Костюк Галина Кирилловна / - федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» - Санкт-Петербург 2017 – с. 134.

85. Weingarten Christian. Laser polishing and laser shape correction of optical glass / Christian Weingarten, Andreas Schmickler, Edgar Willenborg, and Konrad Wissenbach // *Journal of Laser Applications*. — Volume 29, number 1.

86. Авдеев И. В. Модификация поверхности силикатного стекла ионно-плазменной обработкой [Текст] / И. В. Авдеев, С. П. Луцин, А. А. Шрам // Физика и химия обработки материалов. – 2009. – № 2. – С. 54-57.
87. Черезова Л.А. Ионно-лучевые методы в оптической технологии / Л.А. Черезова. – СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2007. – 151 с.
88. Одиноква Е.В. Перспективы получения нанометровой шероховатости поверхности ионно-лучевым методом / Е.В. Одиноква, Ю.В. Панфилов, П.И. Юрченко // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 6. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/801.html>.
89. Panfilov Yury Vacuum methods of surface treatment with subnanometer roughness /Yury Panfilov, Leonid Kolesnik / MATEC Web of Conferences 224, 01117 (2018), ICMTMTE 2018, p.6.
90. Андрианова Н. Н. Исследование процесса ионно-лучевой полировки поверхности оптических деталей приборов / Н. Н. Андрианова, А. М. Борисов, В. В. Боровская, Е. С. Машкова // Прикладная физика. – 2012. – № 2. – С.36-39.
91. Поляков В.В. Модификация поверхности многокомпонентных стекол электронно-лучевой обработкой для элементов микрофлюидики / С.П. Авдеев // Электронный научный журнал Инженерный вестник Дона. – 2018. – №1.
92. Авдеев С.П. Влияние электронно-лучевой обработки на элементный состав цинково-алюмофосфатного стекла / С.П. Авдеев, С.Н. Гаранжа // Материалы Международной научно-технической конференции. – 3-7 декабря 2012 г. intermatic – 2012. – Часть 2. – С.26-27.
93. Авдеев С.П. Повышение механической и химической устойчивости поверхности оптического стекла боролантановой группы / С.П. Авдеев, С.Н. Петров, П.В. Серба, Е.Ю. Гусев // Прикладная физика. – 2010. – №3. – С. 140-142.

94. Дудко Г.В. Формирование предельно гладких поверхностей оптических стекол / Г.В. Дудко, А.А. Кравченко, Д.И. Чередниченко // Физика и химия стекла. – 1987. – Т. 13, №5. – С. 740-746.
95. Луговой Е.В. Расчет оптических характеристик стекол, модифицированных электронным лучом / Е.В. Луговой, С.Н. Петров, П.В. Серба // Научно-технический и прикладной журнал «Известия юфу технические науки». – 2010. – № 6. – С. 211-215.
96. Серба П.В. Электронно-лучевая обработка оптических компонентов на основе боролантановых стекол, применяемых в приборе ориентации по Полярной звезде /П.В.Серба, С.П. Авдеев, С.Н.Петров, С.Н.Гаранжа, Е.В.Луговой // Научный журнал Инженерный вестник Дона. – 2011. – №4. –С. 165-176.
97. Яценко І. В. Покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів оптико-електронних приладів / І.В. Яценко // Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. ДВНЗ ПДТУ. – Маріуполь.: ПДТУ. – 2018. – Вип. 19. – С.113-123.
98. Авдеев С.П. Повышение механической и химической устойчивости поверхности оптического стекла боролантановой группы / С.П. Авдеев, С.Н. Петров, П.В. Серба, Е.Ю Гусев // Прикладная физика. – 2010. – № 3. – С.140-142.
99. Г.В. Канашевич Перспективи використання електронного променя в технологіях інтегральної оптики / Канашевич Г.В., Ващенко В.А., Бондаренко М.О. // Вісник Черкаського державного технологічного інституту. – 2000. – №2. – С.189-193.
100. В.А. Ващенко Влияние режимов электронно-лучевой обработки на свойства поверхностных слоев оптических стекол / Ващенко В.А., Канашевич Г.В., Дмитренко П.П., Рудь М.П., Бондаренко М.А. // Вісник Сумського державного університету. – 2002. – №5(38)-6(39). – С.99-105.

101. Канашевич Г.В. Термoeлектричний вплив низькоенергетичного електронного потоку на дефектний шар оптичного скла / Г. В. Канашевич // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія – 2013. – Вип. 45. – С.123-130.
102. Дудко Г.В. О получении особо гладких поверхностей диэлектрических подложек микросхем /Г.В. Дудко, А.А. Кравченко, Д.И. Чередниченко// Электронная техника, сер. 3. – М.: Электроника, 1986. – Микроэлектроника. вып.5. – С 241.
103. Дудко Г.В. Проблема формирования особо чистых и бездефектных поверхностей. Материалы краткосрочного семинара / Г.В. Дудко, В.Н. Лисоченко. – Ленинград. – 1985. – С.13-16.
104. Лисоченко В.Н. Технология электронно-лучевой полировки плат микросхем и входных окон видик онов: Дис... канд. техн. наук: 05.27.06 / Лисоченко Виталий Николаевич / – К., 1977. – 152 с.
105. Ващенко В.А. Влияние режимов электронно–лучевой обработки на свойства поверхностных слоев оптических стекол / В.А. Ващенко, Г.В. Канашевич, П.П. Дмитренко и др. // Вісник Сумського державного університету. – 2002. – №5(38)–6(39). – С.99-105.
106. Ващенко В.А. Наукові основи керування якістю електронно–променевої обробки виробів із спеціальних оптичних матеріалів: Автореф. дис. д–ра техн. наук: 05.03.07 / В.А. Ващенко / – Київ, 1996. – 35 с.
107. Лохов Ю.Н. Модификация поверхности оптических стекол при электронно–лучевой обработке в вакууме / Ю.Н. Лохов, А.А. Углов, Д.И. Чередниченко // Физика и химия обработки материалов. – 1997. – № 1. – С. 56-62.
108. Кравченко А.А. О формировании предельно гладких поверхностей стекол / А.А. Кравченко, Ю.Н. Лохов, Д.И. Чередниченко // Физика и химия стекла. – 1990. – Т. 16, № 6. – С. 923 - 927.
109. Бондаренко М.О. Підвищення ефективності електронної технології та обладнання для фінішної обробки оптичних пластин під виробу



мікрооптики: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.07 / Бондаренко Максим Олексійович / – Черкаський держ. технологічний ун-т. – Черкаси, 2006. – 155с.

110. Рудь М.П. Підвищення якості поверхневої електронної обробки виробів з оптичного скла: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.07 / Рудь Максим Петрович / – Черкаський держ. технологічний ун-т. – Черкаси – 5 – 2009. – 180 с.

111. Щербаков А. В. Технология обработки материалов. Оборудование электронно-лучевых комплексов / А. В. Щербаков, Р. В. Родякина, В. В. Новокрещенов, В. Н. Ластовиря. 2-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство Юрайт (Серия: Бакалавр. Академический курс), 2018. –208 с.

112. Брюэр Дж. Р. Электроинно-лучевая технология в изготовлении микроэлектронных приборов / Дж. Р. Брюэр, Д. С. Гринич, Д. Р. Херриот и др.; Под ред. Дж. Р. Брюэра: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.

113. Черненко В.С. Променеві методи обробки: Навч. посібник / В.С. Черненко, М.В. Кіндрачук, О.І. Дудка. – К.: Кондор, 2004. – 166 с.

114. Молоковский С.И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С.И. Молоковский. – М: Энергоатомиздат, 1991. – 312 с.

115. Шерстнев Л.Г. Электронная оптика и электронно-лучевые приборы. Учебник для студентов вузов / Л.Г. Шерстнев. – М.: Энергия, 1971. – 368 с.

116. Авдеев С.П. О влиянии электронно-лучевой обработки на поверхность диэлектрических пленок на основе  $Al_2O_3$  / С.П. Авдеев , Е.В. Луговой , П.В. Сербя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 94-98.

117. Кирштейн П.Т. Формирование электронных пучков / П.Т. Кирштейн Г.С. Кайно, У.Е. Уотерс. – Издательство: М.: Мир, 1970. – 600 с.

118. Пирс Дж.Р. Теория и расчет электронных пучков / Дж.Р. Пирс. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 216 с.

119. Шиллер З. Электронно–лучевая технология / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. Пер. с нем. – М.: Энергия, 1980. – 528 с.

120. Аброян И.А. Физические основы электронной и ионной технологии. Учебное пособие для специальностей электронной техники вузов / И.А. Аброян, А.Н. Андронов, А.И. Титов. – Москва: Издательство Высшая школа, 1984. – 320 с.
121. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки / И.В. Алямовский. – М.: Советское радио, 1966. – 454 с.
122. Рыкалин Н.Н. Лазерная и электронно–лучевая обработка материалов. Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокона. – М.: Машиностроение, 1985. – 495с.
123. Кайдалов А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. / А.А. Кайдалов. 2-е изд. перераб. и доп. – Киев: Экотехнология, 2004. – 260с.
124. Зуев И.В. Об измерении диаметра электронного луча методом вращающегося зонда / И.В. Зуев, А.А. Углов // Физика и химия обработки материалов. – 1967. – № 5. – С. 110-112.
125. Aman Kaur Electron beam characterisation methods and devices for welding equipment / Kaur Aman, Colin Ribton , W.Balachandaran // Journal of Materials Processing Technology. – July 2015. – Volume 221. – Pages 225-232.
126. Павлюченко Ю.Л. Метод обертного зонда для дослідження аксіально-симетричних пучків електронів / Ю.Л. Павлюченко, М.Я. Васильчук //Вісник Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут. Серія: Радіотехніка. Радіо апаратобудування. – 1967. – С.54-62
127. Лаптенко В.Д. Управление электронно-лучевой сваркой /В.Д. Лаптенко, А.В. Мурыгин, Ю.Н. Серегин, В.Я. Браверман; Под ред. В.Д. Лаптенка. Красноярск: САА, 2000. – 234 с.
128. Андреев М. Устройство для диагностики электронного пучка /М. Андреев, С. Ковальский, С. Корнилов, Н. Ремпе // Вестник Бурятского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук. Сборники 2018 плазменная эмиссионная электроника. – С. 39-44.

129. Акопянц К.С. Система диагностики электронного луча в установках для электронно-лучевой сварки / К.С. Акопянц, О.К. Назаренко, В.В. Гумовский, В.П. Чернякин // Автоматическая сварка. – 2002. – №10. – С. 30-33.

130. Бочаров А.Н. Экспериментальное исследование геометрических параметров электронного луча / А.Н. Бочаров, А.В. Мурыгин. Под ред. Проф. Г.П. Беякова // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева, СибГАУ. Красноярск. – 2005. – Вып. 6. – С. 191-195.

131. Нархинов В.П. Регистрация и измерение тока ленточных пучков электронов на фиксированном участке сходящейся эмиттерной системы / В.П. Нархинов // Журнал технической физики. – 2002. Т. 72, вып. 4. – С. 136-138.

132. Elmer BY J. W. An enhanced Faraday cup for rapid determination of power density distribution in electron beams / BY J. W. Elmer and A. T. Teruya // Weld. J. – N. Y. – 2001. – 80 (12). – 288s–295s.

133. Elmer J. W. An Overview of the Enhanced Modified Faraday Cup (EMFC) Electron Beam Power Density Distribution Diagnostic / J. W. Elmer, T. A. Palmer, A. T. Teruya / 2nd International Conference on Electron Beam Welding Aachen, Germany March 26, 2012 through March 30, 2012 LLNL-PROC-521891

134. Koleva Elena Electron Beam Characterization at Changes of EBW Process Parameters / Elena Koleva, Georgi Mladenov, Marin Kardjiev, Dimitar Todorov // Electrotechnica+Electronica. – 2014. – Volume 49, Issue 5-6. – P.46-55.

135. Elmer J. W. Trigger probe for determining the orientation of the power distribution of an electron beam / J. W. Elmer, T. A. Palmer and A. T. Teruya / United States Patent 7244950 (250/397) Jul. 17, 2007.

136. Aman P Kaur Electron beam diagnosis for weld quality assurance a thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of doctor of philosophy (phd) by Aman P Kaur Department of Electronic and Computer

Engineering College of Engineering, Design and Physical Sciences Brunel University  
London May 2016.

137. Бочаров А.Н. Определение ширины плотности распределения энергии электронного пучка по его сечению при электронно–лучевой сварке / А.Н. Бочаров, А.В. Мурыгин // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. Под ред. Проф. Г.П. Белякова. Красноярск: СибГАУ, 2005. – Вып. 7. – С. 81-84.

138. Мурыгин А. В. Управление процессом электронно-лучевой сварки с использованием информационных свойств плотности распределения электронного пучка: Дис... док. техн. наук. 05.13.06 / Мурыгин Александр Владимирович / Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева – Красноярск, 2006 – 334 с.

139. ГОСТ 3514-94 Стекло оптическое бесцветное. Технические условия.

140. Лучкин А. Г. Очистка поверхности подложек для нанесения покрытий вакуумно-плазменными методами / А.Г. Лучкин, Г.С. Лучкин // Вестник Казанского технологического университета, г. Казань. – 2012. – №15. С. 208-211.

141. Коваленко Ю.І. Тест на змочування поверхні скла після електронно-променевої мікрообробки / Коваленко Ю.І., Петльований П.В., Рудь М.П., Канашевич Г.В. // Вісник українського матеріалознавчого товариства. Київ. – 2012. – № 5. – С. 57-62.

142. Киселев М.Г. Определение краевого угла смачивания на плоских поверхностях / Киселев М. Г. Савич В. В., Павич Т. П // *Вестник Белорусского национального технического университета*. – 2006. – № 1. – С. 38-41.

143. Глеб Л.К. Оценка качества поверхности оптических деталей методом атомно-силовой микроскопии / Л.К. Глеб, Е.С. Дрозд, Г.Р. Городкин // Контенант. –2013. – Т. 12(4). – С. 82.

144. Білокінь С.О. Підвищення точності діагностування рельєфу та механічних характеристик нанорозмірних структур у приладобудуванні Дис...

канд. техн. наук: 05.11.13 / Білокінь Світлана Олександрівна / – Черкаський держ. технологічний ун-т. – Черкаси, 2015. – 178с.

145. Рудь М.П. Применение метода атомно-силовой микроскопии, как составляющей комплексной методики измерения параметров качества оптических изделий, обработанных низкоэнергетическим электронным потоком / М.П. Рудь, В.П. Бойко, Г.В. Канашевич, Ю.И. Коваленко, И.А.Рева, В.А. Ващенко // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: IX Междунар. конф., 12-15 октября 2010 г: тезисы докл. – Минск, 2010. – С. 220-223.

146. ISO 4287/1 Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности.

147. Скоробогатова Л.А. Технологии материалов для микро- и нанoeлектроники : учеб. пособие / Л.А. Скоробогатова, С.М. Зубрицкий, А.Л. Петров, А. Л. Семёнов. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. – 83 с.

148. Установка универсальная автоматическая вакуумной от качки УВН-71-ПЗ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации

149. Патент №2004021257У Україна, МПК<sup>6</sup> C03B29/00; H01J37/305. Пристрій для електронно-променевого полірування виробів / Канашевич Г.В., Коваленко Ю.І., Бондаренко М.О., Ващенко В.А., Бойко В.П., Рудь М.П., Яценко І.В.; Заявл. 20.02.2004; опублік. 17.01.2005; Бюл. №1. – 3 с.

150. Патент № u201507234 Україна, МПК<sup>6</sup> C03B 29/00 C03B 33/00. Спосіб обробки скла / Канашевич Г.В., Голуб М.В., Коваленко Ю.І.; Заявл. 20.07.2015; опублік. 11.04.2016; Бюл.№7. – 4 с.

151. Авторское свидетельство СССР № 726810, кл. С 03 В 29/00, 1979 (непублик.) Электронно-лучевое устройство / Лисоченко В.Н., Шумський А.Л. и Якушев В.М..

152. Rud M.P. The express-diagnostics of band electronic stream / M.P. Rud, V.P. Boyko, Yu.I. Kovalenko, M.A. Bondarenko, G.V.Kanashevich, V.A. Vaschenko

// Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – №3. – С.49-51.

153. Рудь М.П. Впровадження комп'ютеризованої системи керування в процес електронної обробки оптичних матеріалів / М.П. Рудь, Г.В. Канашевич, В.П. Бойко, Ю.І. Коваленко // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: VII ежегод. междунаrod. пром. конф., 12-16 лютого 2007 р.: тези доп. – сел.Славське-м.Київ, 2007. – С. 460.

154. Рудь М.П. Дослідження просторово-енергетичних характеристик електронного потоку стрічкової форми / М.П. Рудь, В.А.Ващенко, Ю.І. Коваленко, В.П. Бойко, І.В. Яценко // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: X междунар. Пром. конф., 18-22 лютого 2010 р: тези доп. – сел.Славське-м.Київ, 2010. – С. 162-164.

155. Коваленко Ю.И. Исследование распределения энергии в зоне действия ленточного электронного потока / Ю.И. Коваленко, В.С. Антонюк, Л.Г. Полонский // 3б. тез доповідей І-ї Міжнародної науково-технічної конференції “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019”; 13–15 травня 2019 р., – Вінниця : ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. – С. 295- 296.

156. CAN in Automation (CiA) [Електронний ресурс] / CAN in Automation (CiA). – Режим доступу: <http://www.can-cia.org>.

157. Гайдаш Р.П. Формування та керування стрічковим електронним потоком при мікрообробленні елементів пристроїв для адитивного виробництва / Р.П. Гайдаш, Ю.І. Коваленко, М.П. Рудь, М.О. Бондаренко, В.С. Антонюк // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – Вип. 13. – С. 69-78.

158. Рудь М.П., Дослідження та формування стрічкового електронного потоку для мікрообробки поверхонь матеріалів / М.П. Рудь, М.О. Бондаренко, Ю.І. Коваленко, І.В. Яценко та ін. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – №2 – С. 58-63.

159. Рудь М.П. Моделювання низькоенергетичної стрічкової електронної гармати Пірса методом кінцевих елементів/ М.П. Рудь, Г.В. Канашевич, М.О. Бондаренко, Ю.І. Коваленко // Наукові праці: науково-методичний журнал. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2012– Т.191. Комп'ютерні технології. – Вип.179. – С. 28 – 31.

160. Гайдаш Р.П. Математичне моделювання в задачах оптимального керування процесом електронно-променевої мікрообробки діелектричних матеріалів / Р.П. Гайдаш, Ю.І. Коваленко, Ю.Ю. Бондаренко // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-технической конференции, 26-29 сентября 2018 г., г. Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2018. – С. 27.

161. Дрозденко А.А. Физика интенсивных электронных пучков в высокочастотных приборах Q-типа: Дис... канд.. физ.-мат. наук: 01.04.01 / Дрозденко Алексей Александрович / – Сумский гос. ун-т. – Сумы, 2009. – 130 с.

162. Bondarenko M. Research of volt-ampere characteristics of the wire pierce electron gun at electron-beam microprocessing of dielectrics / Bondarenko M., Antonyuk V., Kovalenko Yu., Rud M., Haidash R // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. – 2018. – Vol.4. – No. 1. – pp.58-64.

163. Barabash V. Investigation of the influence of basic technical parameters of ribbon electron flow on the microrelief of the optical glass surface / V. Barabash , I. Zhaivoronok, Y. Kovalenko, V. Antonyuk // International scientific journal "Machines. Technologies. Materials" Issue. – 3/2020. – с.106-109.

164. Коваленко Ю.І. Модифікація нанорельєфу на оптичному склі електронно-променевою мікрообробки / Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, І.В. Яценко, М.П. Рудь та ін. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Черкаси: ЧДТУ, 2012. – №1 – С. 104-107.

165. Коваленко Ю.І. Дослідження впливу морської води на мікрогеометрію поверхні металевих покриттів на оптичному склі К8 / Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, І.А. Рева, В.А. Ващенко та ін. // Вісник

Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – Маріуполь: ПДТУ, 2010. – Вип. 20. – С. 222-225.

166. Антонюк В.С. Модифицирование металлизированных поверхностей ленточным электронным потоком / В.С. Антонюк, Ю.И. Коваленко, М.А. Бондаренко, И.В. Яценко // Инженерия поверхности и реновация изделий: XIII Междунар. науч.-техн. конф., 3-7 июня 2013 г: тезисы докл. – г.Ялта-г.Киев, 2013. – С. 15-19.

167. Бондаренко М.А. Изучение механизма формирования ультратонких функциональных покрытий на оптическом стекле при комбинированной электронно-лучевой микрообработке / М.А. Бондаренко, Ю.И. Коваленко, Ю.Ю. Бондаренко, С.А. Билоконь и др. // Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов: III междунар. науч. конф., 15-16 мая 2014: матер.докл.– Алматы: Казак университеті, 2014. – С. 64-65.

168. Vashchenko V.A. Effect of electron-beam treatment of sensor glass substrates for SPR devices on their metrological characteristics / V.A. Vashchenko, I.V. Yazenko, Yu.I Kovalenko, V.P. Kladko, O.Yo.Gudenko, P.M. Lytvyn, A.A. Korchovy, S.V. Mamykin, O.S. Kondratenko, V.P, Maslov, H.V. Dorozinska, G.V. Dorozinsky. // International scientific journal Semiconductor physics quantum electronics & Optoelectronics. – 2019. – Volume 22, № 4. – P.444-451.

169. Antonyuk V.S. Formation of Wear-Resistant Coatings on Silicon Probes for Atomic Force Microscopy by Thermal Vacuum Evaporation / Antonyuk V.S., Bilokin S.O. Bondarenko M.M., Bondarenko Yu.Yu., Kovalenko Yu.I. // Journal of superhard materials. – 2015. – Vol.37. – No. 2. – pp.112-119.

170. Коваленко Ю.И. Изучение упорядоченных структур, сформированных на металлизированных поверхностях диэлектриков комбинированной электронной технологией / Коваленко Ю.И., Рудь М.П., Яценко И.В., Котляр А.В., Бойко В.П // Электронная микроскопия РКЭМ-2012: XXIV Рос. конф., 29 мая-1 июня 2012: тезисы докл. – г.Черноголовка, 2012. – С.97.



## ДОДАТКИ

## Додаток А.

### Порівняльні таблиці

Таблиця А.1 – Застосування матеріалів для отримання тонких покриттів(інформація з джерел [8, 9])

Тип покриття	Матеріал	Область застосування
Оптичні покриття, в тому числі з захистом	Al, Al+SiO <sub>2</sub> , Al+ZrO <sub>2</sub> , Cu, Cu+CuO <sub>2</sub> , Cu+ZrO <sub>2</sub>	Дзеркальні покриття для різних галузей оптичного приладобудування, охоронних систем та інших застосувань.
Прозорі провідникові покриття	ITO (indiumtinoxide), NiO, ZrO	Оптичне приладобудування, напівпровідникова електроніка, системи оброблення інформації
Захисні покриття	SiO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , деякі метали (Ni, Cr)	Захист від механічних пошкоджень, корозії (окислення), і інші напівпровідникова електроніка
Покриття, що забезпечують паяння або зварювання	Cu, Cr+Cu (з адгезійним підшаром), Ni, Al	Вироби на основі кераміки (керамічні плати, хвилеводи, антени), корпуси приладів, гермоводи тощо.
Електроди	Cu, Ni та інші метали і провідникові покриття	Технологія напівпровідникових приладів, виготовлення друкарських плат, електроди і оптичні плати тощо
Покриття для напівпровідникової електроніки і приладобудування	Різні метали, діелектрики, напівпровідники	Постростові технології напівпровідникових приладів, в тому числі використання плівок аморфних напівпровідників, маскуючі, просвітлюючі та інші покриття
Декоративні покриття	TiN, Cr, Al, Ni	Сувенірна та інша продукція, в яких покриття виконує декоративну функцію, елементи інтер'єру тощо.
Адгезійні і “зародкові” шари	Ti, Cr, Ni та деякі інші	Застосовуються для покращення адгезійних властивостей у випадку, якщо при безпосередньому нанесенні потрібних матеріалів на поверхню об'єкта не вдається забезпечити необхідну адгезію і механічні характеристики покриття
Маскуючі покриття	Al, Ni, SiO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> та інші	Маскуючі покриття для створення заданого рельєфу, наприклад методами сухого травлення

Таблиця А.2 – Порівняльна характеристика основних вакуумних методів нанесення тонких покриттів на оптичні елементи у вакуумі(інформація з джерел [5, 10, 12-18, 22-27, 28-31, 33-39, 41-43, 56-59])

№ п/п	Метод нанесення покриттів у вакуумі	Робоче середовище реалізації методу	Основні види покриттів	Переваги методу	Недоліки методу
1	2	3	4	5	6
1	Резистивне випаровування	вакуум $10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па.	Металеві покриття: Al, Ag, Cu, Zn, Cd, Cr, Ni, Co, Si	Простота конструкції нагрівача, висока швидкість осадження, високий ККД, відсутність іонізуючого випромінювання, низька собівартість обладнання, отримання покриттів різного хімічного складу, можливість отримання товстих покриттів	Забруднення плівки матеріалом нагрівача, низький термін служби випарника, великий об'єм завантаження, невисокі механічні властивості покриття, інерційність процесу, недостатня щільність структури, невисока адгезія
2	Лазерне випаровування	вакуум $10^{-5} \dots 10^{-3}$ Па.	Напівпровідникові покриття для мікроелектроніки $Sb_2S_3$ , $As_2S_3$ , $SrTiO_3$ , $BaTiO_3$ , $GaAs$	Збереження стехіометричного складу випаровуємої речовини, отримання покриттів складних з'єднань, високі імпульсні швидкості осадження плівки(до 10нм/с), висока чистота покриттів, відсутність нагрівних елементів в середині вакуумного об'єму	Низька ефективність лазерних систем і повторюваність тех.нологічного процесу, невисока міцність зчеплення з основою, нерегулюєма швидкість осадження, низька і непостійна енергія осадження частинок, складність керування потужним лазерним променем

Продовження таблиці А.2

1	2	3	4	5	6
3	Електронно-променеве випаровування	вакуум $10^{-4} \dots 10^{-3}$ Па реакційні газу $N_2$ , $O_2$ , $CH_4$ .	Метале-ві покриття: Al, Ag, Cu, Ti, Cr, Ni, Co, Si Керамічні покриття: TiN, ZrN, TiC, ZrC, TiCN, ZrCN, $Al_2O_3$ , $TiO_2$ , $SiO_2$ , $ZrO_2$ , $ZrO_2/Y_2O_3$	Універсальність (можливість послідовного нанесення різноманітних плівок з різних джерел), висока швидкість осадження конденсату і випаровування матеріалу, можливість використання широкого спектру матеріалів покриттів, висока чистота і однорідність покриттів, простота реалізації, можливість отримання товстих конденсатів (до 200мкм), повністю автоматизоване управління	Наявність іонізуючого випромінювання, низька і непостійна енергія конденсуючих частинок, невисока міцність зчеплення з основою, нерегулюєма швидкість осадження, низька рівномірність товщини плівок на výroбах складної конфігурації
4	Вакуумно-дугове випаровування	вакуум $10^{-3} \dots 10^{-2}$ Па; реакційні газу $N_2$ , $O_2$ , $CH_4$ ; тиск подачі газу 0,01...1 Па, температура 300...600 °C.	Метале-ві покриття: Ti, Zr, Hf, Cr, Ta, Ni, Co, Si, MeCrAlY (Me=Ni, Co) Керамічні покриття: TiN, ZrN, $TiO_2$ ,	Висока швидкість осадження, високі характеристики покриттів і можливість гнучкого керування параметрами покриття, забезпечується висока адгезія (до 250 МПа) відносна простота технологічної реалізації, ефективне іонне очищення перед осадженням	Наявність в структурі покриття мікрокрапельної металевої фази, відносно високі температури осадження покриттів

Продовження таблиці А.2

1	2	3	4	5	6
5	Іонно-плазмове (магнетронне) розпилення	чисті гази Ar, N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> ; тиском 0,05-1 Па, Температура 60...6000 °C	Метале-ві покриття: Al, Ag, Au, Cu, Zn, Sn, CdTi, Zr, та інш. Керамічні покриття: TiN, ZrN, CrN, TiC, TiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> Нано-композити: TiN/BN, ZrN/Cu, ZrO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> TiN/NbN	Висока швидкість формування плівок, можливість одночасної обробки великої кількості пластин, висока адгезія і рівномірність покриттів, щільна мікро (нано) кристалева структура металевих і керамічних покриттів при повній відсутності крапельної фази, можливість нанесення покриттів на термочутливі матеріали при низьких температурах, низький рівень радіаційних дефектів, відсутність перегріву підкладки, мала ступінь забруднення плівок включеннями	Проникнення аргона в плівку (невисока чистота покриттів), наявність проникаючого випромінювання, нерегулюєма енергія осаджуємих частинок, відносно висока вартість обладнання, відносна складність технічної реалізації метода при отриманні реактивних (керамічних) покриттів
6	Іонно-променеве напилення	чисті гази Ar, N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , вакуум 10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-2</sup> Па.	Метале-ві покриття: Au, Pt, Cu, Si, Ni, Al, Cr. Оксидні покриття Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> Покриття DLC	Можливість нанесення плівок матеріалів складного складу зі збереженням компонентного складу мішені, відсутність електричних полів в області підкладки точний контроль параметрів осадження, низька температура мішені	Відносно низька швидкість нанесення плівки (до 0,02 нм/с), не висока чистота плівки (більша кількість газових включень в плівці), складність обладнання, висока вартість обладнання

## Додаток Б.

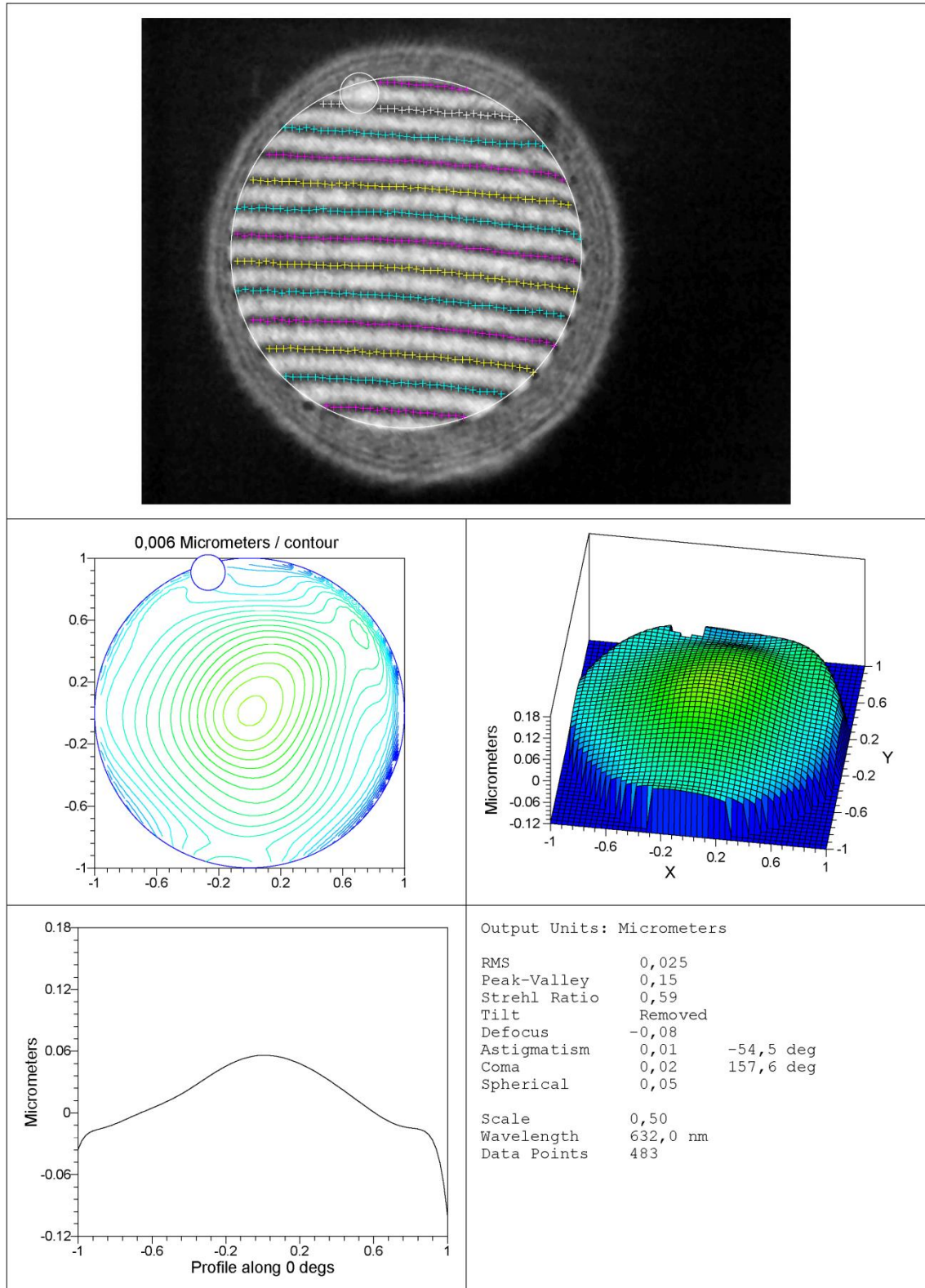
### Основні технічні характеристики експериментальної установки для здійснення комбінованого електронно-променевого оброблення

Техніко-експлуатаційні характеристики	Діапазон значень
Граничний вакуум в робочій камері, мм.рт.ст.	$10^{-5} \dots 10^{-6}$
Струм розігріву випарника, $I_B$ , А	30...400, $\pm 5\%$ ,
Струм розжарення катоду, $I_K$ , А	0...30, $\pm 5\%$
Струм електронного потоку, $I_n$ , $\times 10^{-3}$ , А	50...400, $\pm 5\%$
Прискорююча напруга, $U_{прис} \times 10^3$ , В	0...6, $\pm 1\%$
Напруга на модуляторі, $U_{мод}$ , В	0...65, $\pm 1\%$
Пульсація струму електронного потоку, %	0,1...0,5
Нестабільність прискорюючої напруги, %	2...3
Резистивний випарник максимальною потужністю, кВт	2,0
Електронний випарник з кільцевим катодом максимальною потужністю, кВт	2,5
Відстань від поверхні випарника, аноду ЕПГ Пірса до оброблюваної поверхні, $H \times 10^{-3}$ , м	10...50 $\pm 1\%$
Швидкість оберткової подачі, $w$ , об/хв	5...150
Максимальна температура нагріву підкладинок, $^{\circ}\text{C}$	до 830
Максимальна температура нагріву робочої камери, $^{\circ}\text{C}$	90
Точність установки температури не більше, $^{\circ}\text{C}$	$\pm 3$
Відхилення товщини плівки по пристрою оберткової подачі не більше	$\pm 5\%$
Тиск стиснутого повітря, атм.	3...5 $\pm 1,5\%$
Розміри зони дії електронного потоку на поверхню, $\times 10^{-3}$ , м - вздовж вісі ОХ - вздовж вісі ОУ	0,2...4,5 60
Розміри робочої камери, $\times 10^{-3}$ , м: діаметр висота	500 640

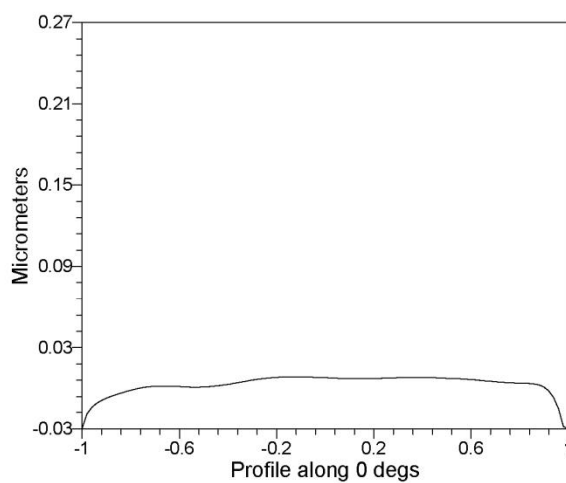
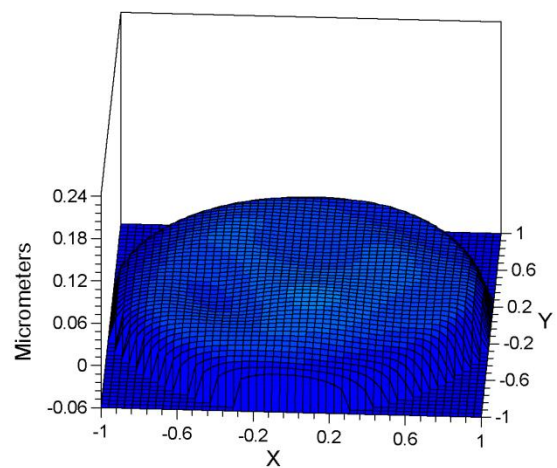
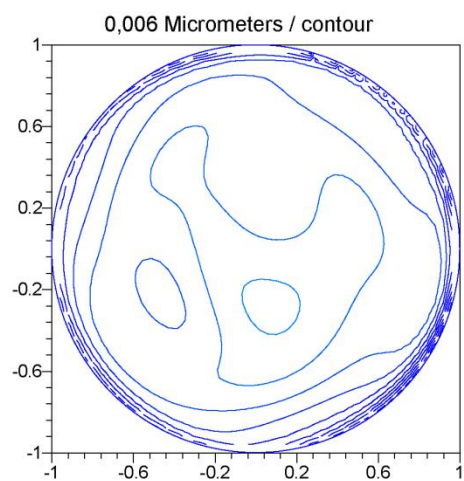
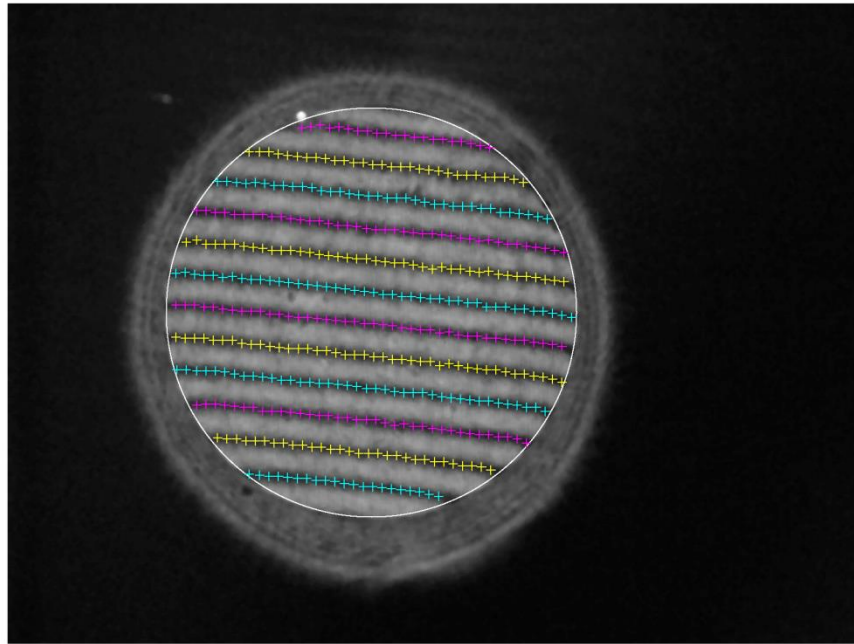
## Додаток В

### Результати дослідження форми поверхні оптичного скла марки К8 після ЕПО за різних режимів обробки

#### Quick Fringe Test Report



## Quick Fringe Test Report



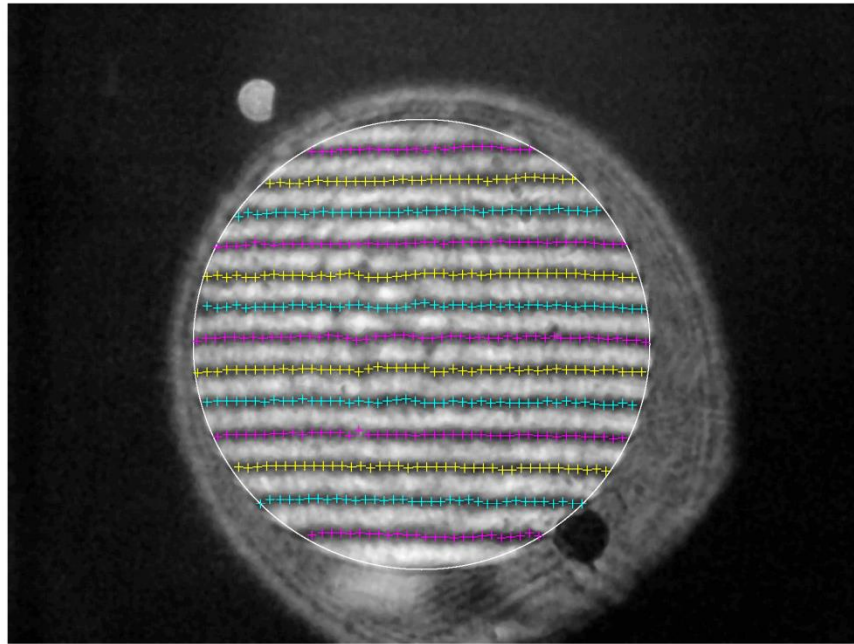
Output Units: Micrometers

RMS	0,009	
Peak-Valley	0,07	
Strehl Ratio	0,63	
Tilt	Removed	
Defocus	-0,02	
Astigmatism	0,00	-49,9 deg
Coma	0,01	-140,5 deg
Spherical	-0,05	

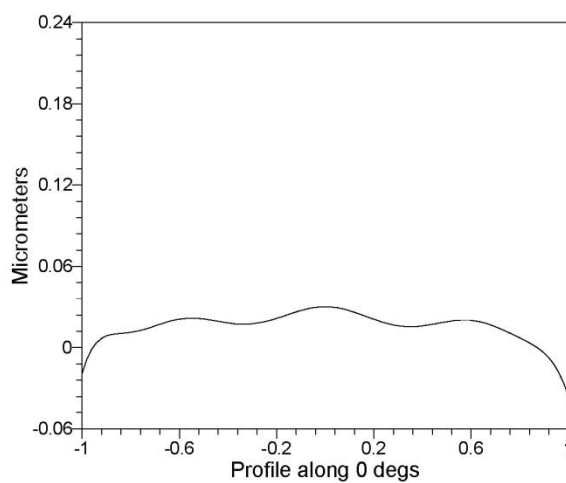
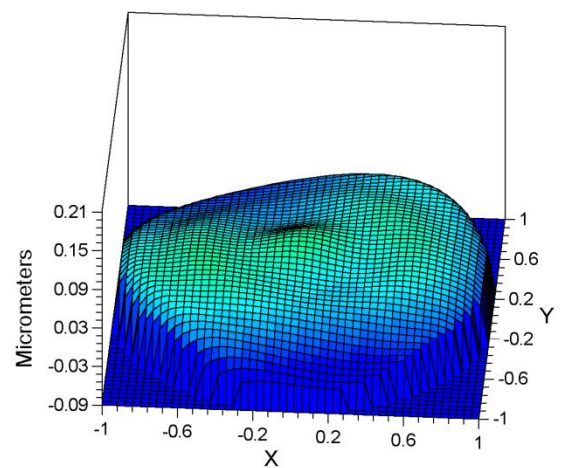
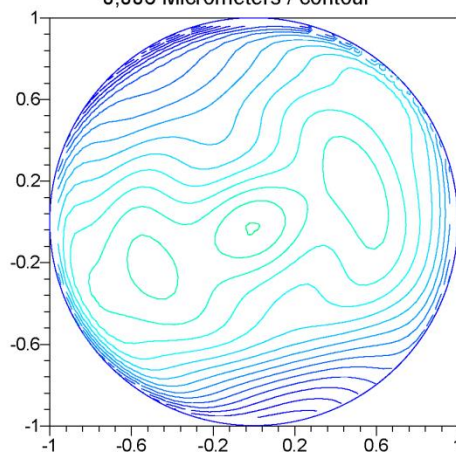
Scale	0,50
Wavelength	632,0 nm
Data Points	422



## Quick Fringe Test Report



0,006 Micrometers / contour

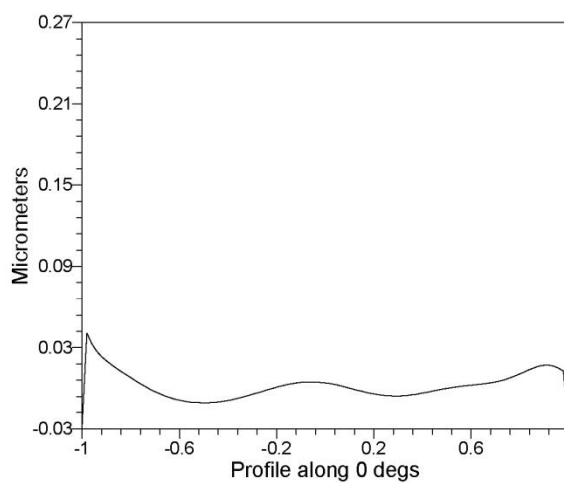
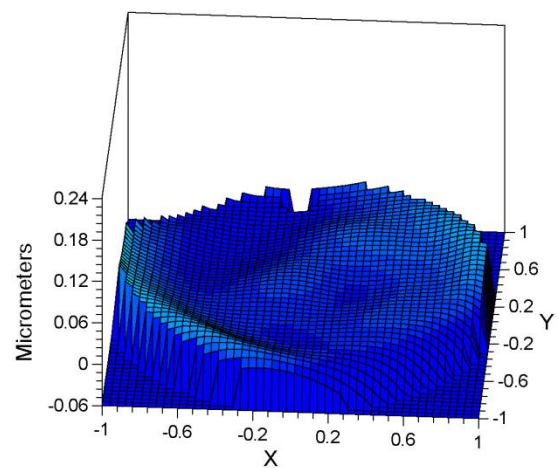
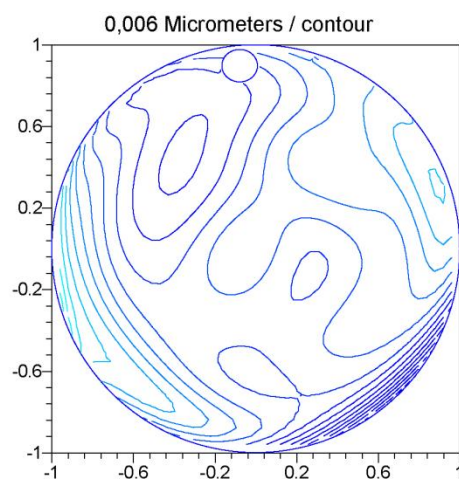
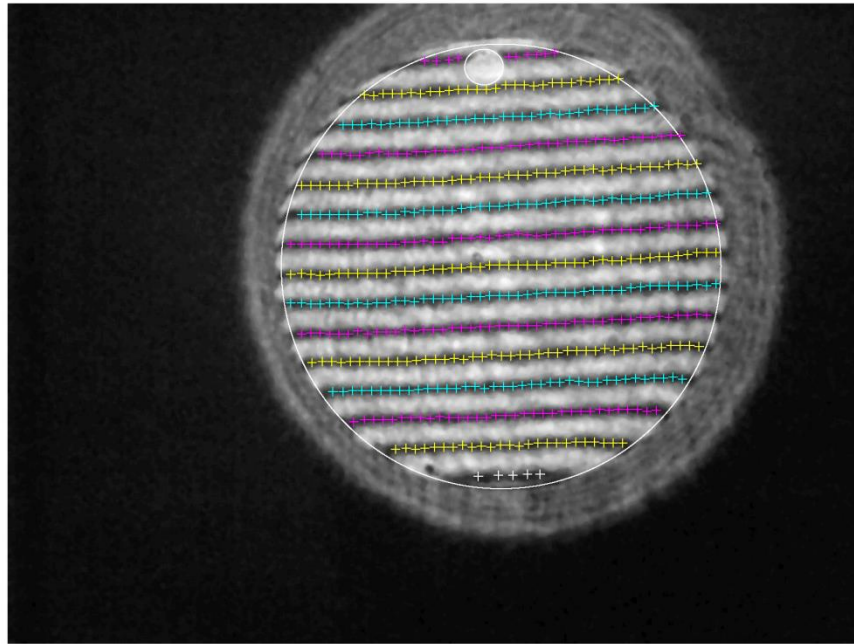


Output Units: Micrometers

RMS	0,019	
Peak-Valley	0,11	
Strehl Ratio	0,61	
Tilt	Removed	
Defocus	-0,05	
Astigmatism	0,06	-20,9 deg
Coma	0,02	-96,5 deg
Spherical	-0,04	

Scale	0,50
Wavelength	632,0 nm
Data Points	520

## Quick Fringe Test Report



Output Units: Micrometers

RMS	0,012	
Peak-Valley	0,11	
Strehl Ratio	0,62	
Tilt	Removed	
Defocus	0,01	
Astigmatism	0,05	-28,9 deg
Coma	0,04	-160,1 deg
Spherical	0,01	

Scale	0,50
Wavelength	632,0 nm
Data Points	520

## Додаток Г

### Документація про наукову значимість, практичне використання та впровадження основних результатів роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о ректора Черкаського  
державного  
технологічного університету

С.А. Назаренко

« 15 » 2015 р.



#### ДОВІДКА

**про впровадження в навчальний процес Черкаського державного  
технологічного університету матеріалів дисертаційної роботи**

**КОВАЛЕНКО ЮРІЯ ІВАНОВИЧА**

Дисертаційна робота Коваленко Ю.І. виконувалася в лабораторіях «Вакуумної техніки та електронно-променевих методів обробки» та «Нанометричних досліджень» навчально-наукового центру «Мікронанотехнології та обладнання» кафедри фізики при безпосередній участі дисертанта при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень по визначенню основних факторів, що впливають на якісні характеристики модифікованих тонких покриттів, отриманих із застосуванням комбінованої технології, створені методик та проведені експериментальних досліджень якісних характеристик поверхонь методом АСМ.

Основні результати дисертаційного дослідження Коваленко Ю.І. застосовуються у навчальному процесі Черкаського державного технологічного університету при викладанні курсу дисципліни «Теоретичні основи теплотехніки» студентам напрямів підготовки 6.050502 – Інженерна механіка, 6.050503 – Машинобудування, 6.070106 – Автомобільний транспорт, при викладанні дисципліни «Основи теплотехніки» студентам напряму підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології, при викладанні дисципліни «Фізико-хімічні основи обробки матеріалів КПЕ» для студентів спеціальності 8.05050204, 7.05050204 «Обробка металів за спецтехнологіями», при виконанні курсової роботи та проведенні лабораторних робіт з дисципліни



«Технологія вакуумної обробки» для студентів спеціальності 7.05050204 «Обробка металів за спецтехнологіями» на факультеті комп'ютеризованих технологій машинобудування та дизайну, факультеті електронних технологій.

На основі отриманих матеріалів розроблено лабораторні роботи «Одержання тонких металевих плівок на поверхні матеріалу осадженням з парової фази», «Регульований нагрів та охолодження оптичного скла у вакуумі за допомогою приладу РИФ-101», «Будова та принцип дії електронно-променевої гармати Пірса для поверхневої термообробки матеріалу», «Електронно-променева обробка поверхні оптичного і технічного скла» «Змочування поверхні оптичного матеріалу», «Адгезія покриття», «Залишкові термонапруження у склі» виконання яких проводиться студентами в спеціалізованих лабораторіях «Вакуумної техніки та електронно-променевих методів обробки» та «Нанометричних досліджень» кафедри фізики, що дозволяє їм оволодіти знаннями надбаного матеріалу та наочно ознайомитися із комбінованою технологією отримання тонких функціональних покриттів на діелектриках з подальшою їх електронно-променевою обробкою, навчитися проводити дослідження нанорельєфу та визначати якісні характеристики отриманих покриттів, аналізувати та обробляти результати досліджень.

Декан факультету електронних технологій, к.т.н., доцент

А.М. Чорній

Декан факультету комп'ютерних технологій машинобудування і дизайну, к.е.н.

С.М. Мильніченко

Завідувач кафедри фізики, д.т.н., професор

В.А. Ващенко

## Акт

о практическом использовании и внедрении в производственные процессы ОДО “Микротестмашины” (г. Гомель, Беларусь) результатов диссертационной работы Коваленко Юрия Ивановича

Результаты исследований, полученные Ю.И. Коваленко в области тонких пленок для усовершенствования изделий с элементами из оптических стекол (К8, БК10 и др.) путем предварительной электронно-лучевой обработки их поверхностей с последующим нанесением тонких покрытий и дальнейшей модификацией поверхности тонких пленок ленточным электронным лучом в одном технологическом цикле, имеют большое научное и практическое значение при изготовлении оптических элементов изделий, которые используются на нашем предприятии для элементов систем атомно-силового микроскопа. Эти изделия используются в ОДО “Микротестмашины” в качестве зеркал системы фотодетектирования в атомно-силовых микроскопах серии NT.

По результатам проведенных Ю.И. Коваленко теоретико-экспериментальных исследований показано, что использование вышеуказанных изделий на нашем предприятии позволяет повышать в 1,5...2 раза точность и воспроизводимость позиционирования лазерного излучения на фотодетекторе атомно-силовых микроскопов с учетом влияния условий окружающей среды.

Директор ОДО “Микротестмашины”



А. А. Суслов



Общество с дополнительной ответственностью  
**«Микротестмашины»**

Осн. 2000 г. • УНП 490001529

ул. Тельмана 44 оф.6  
246003 г. Гомель, Беларусь  
Тел./Факс +375 232 715463  
Моб. +375 29 6774642  
E-mail: microtm@mail.ru  
http://microtm.com

исх. № 27 от 16.11.2012 г.

на № от

### АКТ

испытаний пластин из оптического стекла (марок К8, БК10) и фотопластин после осаждения на их поверхностях комбинированных покрытий и последующей электронно-лучевой микрообработки

Мы, нижеподписавшиеся, с одной стороны старший преподаватель кафедры физики Черкасского государственного технологического университета Коваленко Ю.И. и с другой стороны директор ОДО «Микротестмашины» (г. Гомель, Беларусь) к.т.н. Суслов А.А. на основании договора о Международном научно-техническом сотрудничестве от 14.10.2003 г. составили настоящий акт о том, что за период с 13.11.2012 г. по 16.11.2012 г. в производственных условиях ОДО «Микротестмашины» с помощью атомно-силового микроскопа «NT-206V» проведены сравнительные испытания поверхностей пластин из оптического стекла марок К8, БК10, ТК21, фотопластин и оптической керамики КО-1, КО-2, поверхности которых были модифицированы комбинированными покрытиями с дальнейшей их обработкой ленточным электронным потоком.

В результате испытаний установлено, что после электронно-лучевой обработки остаточные микронеровности на поверхностях с осажденными на них комбинированными покрытиями уменьшились в среднем в 6,6...13,1 раза при этом микротвердость поверхностных слоев этих образцов увеличилась в 1,3...1,85 раз.

Отдельные образцы используются в ОДО «Микротестмашины» в качестве тестовых образцов для оценки пространственных параметров разрешения при измерениях на атомно-силовом микроскопе «NT-206V».

Директор ОДО «Микротестмашины»

А.А. Суслов

Старший преподаватель  
кафедры физики ЧГТУ

Ю.И. Коваленко

Підпис *Коваленко Ю.И.*  
засвідчую  
Відділ кадрів *[Signature]*



исх. №2 от 10.01.2014 г.

на № от

**АКТ**производственных испытаний кремниевых зондов CSC38,  
модифицированных тонким углеродным покрытием.

Мы, нижеподписавшиеся, с одной стороны: руководители работ д.т.н., профессор, зав. кафедры физики Черкасского государственного технологического университета Ващенко В.А.; к.т.н., доцент Черкасского государственного технологического университета Бондаренко М.А.; к.т.н., доцент Черкасского государственного технологического университета Яценко И.В.; соискатели научной степени кандидата технических наук Черкасского государственного технологического университета Билоконь С.А., Коваленко Ю.И. и с другой стороны: директор ОДО «Микротестмашины» (г. Гомель, Беларусь) к.т.н. Суслов А.А. на основании договора о Международном научно-техническом сотрудничестве от 14.10.2003 г. составили настоящий акт в том, что за период с 27.10.13 г. по 05.01.14 г. в производственных условиях ОДО «Микротестмашины» с помощью атомно-силового микроскопа «NT-206V» проведены сравнительные испытания зондов CSC38, модифицированных функциональным покрытием путем термовакuumного осаждения углеродной пленки (толщиной менее 8 нм) с ее дальнейшей электронной обработкой в одном технологическом цикле.

Испытания модифицированных зондов проводилось на тестовых структурах TGZ1 с дальнейшим контролем их точности измерений, длительности надежной эксплуатации и повторяемости результатов сканирования.

В результате испытаний установлено, что модификация зондов тонким углеродным покрытием позволила увеличить точность измерений нанорельефа поверхности на 7...10%; повысить длительность надежной эксплуатации на 40...60 минут; увеличить повторяемость результатов в 1,4...3,4 раза.

Отдельные образцы зондов используются в ОДО «Микротестмашины» для проведения циклов комплексных испытаний нанорельефа и физико-механических характеристик поверхностей на атомно-силовом микроскопе «NT-206V».

Директор ОДО «Микротестмашины»

А.А. Суслов

Научный руководитель работ

В.А. Ващенко

Ответственный исполнитель работ

М.А. Бондаренко

Научный сотрудник

И.В. Яценко

Соискатель ЧГТУ

С.А. Билоконь

Соискатель ЧГТУ

Ю.И. Коваленко



«Фотоніка плюс»  
18001, Україна, м. Черкаси  
вул. Дахнівська 50/12  
тел /0472/33-35-15  
E-mail: [info@fotonikaplus.com.ua](mailto:info@fotonikaplus.com.ua)

## ДОВІДКА

про використання та впровадження у виробничі процеси підприємства «Фотоніка Плюс» (м. Черкаси) результатів дисертаційної роботи **Коваленка Юрія Івановича**

Результати досліджень, які представлені у дисертаційній роботі Ю.І.Коваленка мають важливе значення для розробок нашого підприємства в області лазерних медичних приладів.

Модернізоване технологічне обладнання для комбінованої електронно-променевої обробки оптичних елементів шляхом поєднання в одному технологічному циклі процесів поверхневого термічного напилення тонких покриттів з подальшим їх електронно-променевим модифікуванням та дозволило здійснювати високопродуктивну і якісну комбіновану ЕПО

Методики експериментальних досліджень, які використовуються в роботі Ю.І.Коваленка призначені для дослідження та контролю геометричних і механічних характеристик поверхонь оптичних матеріалів, контроль поверхневого шару матеріалів та тонких покриттів на них є важливими, як при їх безпосередньому виготовленні, так і для подальшого вдосконалення технології виготовлення оптичних елементів.

На сьогодні розглядаються питання можливості подальшого використання вищенаведених науково-прикладних результатів Ю.І.Коваленка для виготовлення елементів медичних приладів, що розробляються нашим підприємством.

Директор ЧМПП «Фотоніка Плюс», к.т.н.



В.В. Холін





ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «ОНТФ»

### ДОВІДКА

про наукову значимість, практичне використання і впровадження результатів експериментальних досліджень технологічного електронно-променевого обладнання, технології комбінованої електронно-променевої обробки, які розроблені КОВАЛЕНКОМ ЮРИЄМ ІВАНОВИЧЕМ, старшим викладачем кафедри фундаментальних дисциплін та прикладного матеріалознавства Черкаського державного технологічного університету

Результати досліджень, що наведені в дисертаційній роботі Коваленка Ю.І. представляють науковий та практичний інтерес для оптичного виробництва, елементної бази мікрооптики та інтегральної оптики, телекомунікацій, точного машино- та приладобудування з точки зору можливості створення оптичних елементів з підвищеними якісними характеристиками.

Впровадження комбінованої електронно-променевої технології при обробці елементів з оптичного скла сорту «крони» дозволило: зменшити середньоквадратичну мікрошорсткість поверхні  $R_{ms}$  з 4,67 нм до 2,32 нм; підвищити зносостійкість їх поверхонь у 2,5...2,8 разів; збільшити час надійної експлуатації у 1,3...1,6 разів, а ймовірність безвідмовної роботи з 0,95 до 0,98, а також збільшити повторюваність результатів обробки з 30...35% до 75...80%.

ТОВ «НВФ ОНТФ» наразі розглядає питання використання розробок Коваленка Ю.І. для виготовлення елементів приладів медичної техніки та комунікаційного зв'язку (коліматори, плати оптичних інтегральних схем, лінзові растри тощо).

Директор ТОВ «Науково-виробнича фірма «ОНТФ»



В. К. Микитюк

Тел./факс: +38 (0472) 33-72-13  
Тел./факс: +38 (0472) 36-10-45

Поштова адреса:  
вул. Б. Вишневецького, 85  
18000, м. Черкаси, Україна

E-mail: [info@ontf.ck.ua](mailto:info@ontf.ck.ua)  
Web: [www.ontf.ck.ua](http://www.ontf.ck.ua)

**ПРИВАТНЕ  
АКЦІОНЕРНЕ  
ТОВАРИСТВО  
"УКРП'ЄЗО"**



ул. Сумгайтська, 10, м. Черкаси, 18016, Україна  
Телефон: +38(0472) 66-16-10, 66-65-36  
Факс: +38(0472) 360300  
Веб-сайт: <http://www.ukrpiezo.by.ru>

**ЧАСТНОЕ  
АКЦИОНЕРНОЕ  
ОБЩЕСТВО  
"УКРПЬЕЗО"**

ул. Сумгайтская, 10, г. Черкасы, 18016, Украина  
Телефон: +38(0472) 66-16-10, 66-65-36  
Факс: +38(0472) 360300  
Веб-сайт: <http://www.ukrpiezo.by.ru>

«13» 11 2019 р. № 566

на № \_\_\_\_\_ від « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ДОВІДКА**

про наукову значимість, практичне використання і впровадження результатів експериментальних досліджень технологічного електронно-променевого обладнання, технології комбінованої електронно-променевої обробки, які розроблені КОВАЛЕНКОМ ЮРИЄМ ІВАНОВИЧЕМ, старшим викладачем кафедри фундаментальних дисциплін та прикладного матеріалознавства Черкаського державного технологічного університету

Результати наукових досліджень, які виконані Ю.І.Коваленком в області вдосконалення конкурентоспроможної, високоефективної, економічною ефективною, екологічно чистої технології комбінованої електронно-променевої обробки для виготовлення якісних оптичних елементів мають важливе наукове і практичне значення для нашого підприємства, де використовуються для отримання оптичних елементів, які застосовуються у виробках точного приладобудування та машинобудування.



Модернізоване технологічне обладнання комбінованої електронно-променевої обробки оптичних матеріалів шляхом автоматизації технологічного процесу електронно-променевого модифікування дозволило здійснювати високопродуктивну (підвищити надійність експлуатації на 30...60% та ймовірність безвідмовної роботи на 3...5%) та якісну (зменшити мікрошорсткість поверхні підкладинки у 2...3 рази, підвищити її зносостійкість у 2,5...2,8 разів) комбіновану ЕПО оптичних матеріалів в одному технологічному циклі.

Методики експериментальних досліджень, як удосконалені відомі, так і оригінальні, створені автором і які призначенні для дослідження та контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь оптичних матеріалів контролю товщини, адгезійної міцності, зносостійкості поверхневого шару матеріалів та тонких покриттів на них є важливими, як при їх безпосередньому виготовленні, так і для подальшого вдосконалення технології виготовлення оптичних елементів.

Патентний захист технічних рішень комбінованої електронно-променевої обробки оптичних елементів стрічковим електронним потоком, вказує на новизну розробок і розширення технологічних можливостей отримання якісних оптичних елементів та є актуальним з точки зору розробки і впровадження нашим підприємством.

В цілому, сукупність наукових досліджень та розробок в рамках дисертаційної роботи Ю.І. Коваленка можна розглядати, як рішення важливого для точного машино-, приладобудування, оптики, медицини, енергетики та інших стратегічних галузей України, науково-технічного проблемного питання в області створення високоякісних оптичних елементів.

Генеральний директор ПрАТ "Укрп'єзо"



Л. В. Баглій

## Додаток Д.

### Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Покриття у приладобудуванні [Текст]: монографія / В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик, Ю.Ю. Бондаренко, Ю.І. Коваленко [та ін.] // К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 360 с.
2. Vashchenko V.A. Effect of electron-beam treatment of sensor glass substrates for SPR devices on their metrological characteristics / V.A. Vashchenko, I.V. Yazenko, Yu.I. Kovalenko, V.P. Kladko, O.Yo.Gudenko, P.M. Lytvyn, A.A. Korchovyi, S.V. Mamykin, O.S. Kondratenko, V.P. Maslov, H.V. Dorozinska, G.V. Dorozinsky. / International scientific journal Semiconductor physics quantum electronics & Optoelectronics – Volume 22, № 4. 2019. – P.444-451.
3. Antonyuk V.S. Formation of Wear-Resistant Coatings on Silicon Probes for Atomic Force Microscopy by Thermal Vacuum Evaporation / Antonyuk V.S., Bilokin S.O. Bondarenko M.M., Bondarenko Yu.Yu., Kovalenko Yu.I. // Journal of superhard materials. – 2015. – Vol.37. – No. 2. – pp.112-119.
4. Rud M.P., Boyko V.P., Kovalenko Yu.I., Bondarenko M.A., Kanashevich G.V., Vaschenko V.A. The express-diagnostics of band electronic stream / Вісник Черкаського державного технологічного університету, №3, 2005. – С.49-51.
5. Коваленко Ю.І. Дослідження впливу морської води на мікрогеометрію поверхні металевих покриттів на оптичному склі К8 / Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, І.А. Рева, В.А. Ващенко [та ін.] / Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – Маріуполь: ПДТУ, 2010. – Вип. 20. – С. 222-225.
6. Коваленко Ю.І. Модифікація нанорельєфу на оптичному склі електронно-променевою мікрообробкою / Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, І.В. Яценко, М.П. Рудь [та ін.] / Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Черкаси: ЧДТУ, 2012. – №1 – С. 104-107.

7. Рудь М.П., Дослідження та формування стрічкового електронного потоку для мікрообробки поверхонь матеріалів / М.П. Рудь, М.О. Бондаренко, Ю.І. Коваленко, І.В. Яценко [та ін.] / Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – №2 – С. 58-63.
8. Коваленко Ю.І. Вплив режимів ультразвукового очищення п'єзоелектричних елементів на якість сформованих на їхніх поверхнях срібних електродів / Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: машинобудування: зб. наук. праць. – Київ: НТУУ «КПІ», 2012. – №64. – С. 87-90.
9. Антонюк В.С. Підвищення мікротвердості та зносостійкості поверхонь елементів виробів з оптичного скла мікрообробкою електронним потоком у вакуумі / В.С. Антонюк, Ю.І. Коваленко, Ю.Ю. Бондаренко, М.О. Бондаренко / Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія Технічні науки. Вип. 31 (72) – 2015. – С. 3-9.
10. Bondarenko M. Research of volt-ampere characteristics of the wire pierce electron gun at electron-beam microprocessing of dielectrics / Bondarenko M., Antonyuk V., Kovalenko Yu., Rud M., Haidash R // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. – 2018. – Vol.4. – No. 1. – pp.58-64.
11. Коваленко Ю.І. Дослідження вольт-амперних характеристик дрітчастої електронної гармати Пірса для електронно-променевої мікрообробки діелектриків / Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, В.С. Антонюк/ Технічна інженерія, наукове видання Державного університету "Житомирська політехніка". № 1 (85), 2020. – С. 53-59.
12. Рудь М.П. Моделювання низькоенергетичної стрічкової електронної гармати Пірса методом кінцевих елементів / М.П. Рудь, Г.В. Канашевич, М.О. Бондаренко, Ю.І. Коваленко / Наукові праці: науково-методичний журнал. – Вип.179. Т.191. Комп'ютерні технології. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2012 – С. 28 – 31.

13. Коваленко Ю.І. Тест на змочування поверхні скла після електронно-променевої мікрообробки / Ю.І. Коваленко, П.В. Петльований, М.П. Рудь, Г.В. Канашевич // Вісник українського матеріалознавчого товариства - Київ, 2012. - № 5. - С. 57-62.

14. Гайдаш Р.П. Формування та керування стрічковим електронним потоком при мікрообробленні елементів пристроїв для адитивного виробництва / Р.П.Гайдаш, Ю.І.Коваленко, М.П.Рудь, М.О.Бондаренко, В.С.Антонюк // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – Вип. 13. – С. 69-78.

15. Barabash V. Investigation of the influence of basic technical parameters of ribbon electron flow on the microrelief of the optical glass surface /V. Barabash , I. Zhaivoronok, Y. Kovalenko, V. Antonyuk/ International scientific journal "Machines. Technologies. Materials" Issue 3/2020 , с.106-109.

16. Патент №2004021257 Україна, МПК<sup>6</sup> C03B29/00; H01J37/305. Пристрій для електронно-променевого полірування виробів / Г.В.Канашевич, Ю.І.Коваленко, М.О.Бондаренко, В.А.Ващенко, В.П.Бойко, М.П.Рудь, І.В.Яценко. Заявл. 20.02.2004; опублік. 17.01.2005; Бюл. №1. – 3 с.

17. Патент № u201507234 Україна, МПК<sup>6</sup> C03B 29/00 C03B 33/00. Спосіб обробки скла / Канашевич Г.В. Голуб М.В., Коваленко Ю.І. Заявл. 20.07.2015, опублік. 11.04.2016; Бюл.№7. – 4 с.

18. Бондаренко М.А. Исследование микрогеометрии поверхности оптических стекол после электронной и после лазерной обработки методом атомно-силовой микроскопии / М.А.Бондаренко, Ю.Б.Шевченко, В.П.Бойко, Ю.И.Коваленко [и др.] // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: VII Междунар. сем., 1–3 ноября 2006 г: тезисы докл. – Минск, 2006. – С. 139-142.

19. Рудь М.П. Впровадження комп'ютеризованої системи керування в процес електронної обробки оптичних матеріалів / М.П.Рудь, Г.В.Канашевич, В.П.Бойко, Ю.І.Коваленко [и др.] // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: VII ежегод.

международ. пром. конф., 12-16 лютого 2007 р.: тези доп. – сел.Славське-м.Київ, 2007. – С. 460.

20. Рудь М.П. Дослідження просторово-енергетичних характеристик електронного потоку стрічкової форми / М.П. Рудь, В.А. Ващенко, Ю.І. Коваленко, В.П. Бойко, І.В. Яценко // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: X международ. Пром. конф., 18-22 лютого 2010 р: тези доп. – сел. Славське-м. Київ, 2010. – С. 162-164.

21. Рудь М.П. Применение метода атомно-силовой микроскопии, как составляющей комплексной методики измерения параметров качества оптических изделий, обработанных низкоэнергетическим электронным потоком / М.П. Рудь, В.П. Бойко, Г.В. Канашевич, Ю.И. Коваленко, И.А. Рева, В.А. Ващенко // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: IX Междунар. конф., 12-15 октября 2010 г: тезисы докл. – Минск, 2010. – С. 220-223.

22. Коваленко Ю.И. Изучение упорядоченных структур, сформированных на металлизированных поверхностях диэлектриков комбинированной электронной технологией / Ю.И. Коваленко, М.П. Рудь, И.В. Яценко, А.В. Котляр, В.П. Бойко // Электронная микроскопия РКЭМ-2012: XXIV Рос. конф., 29 мая-1 июня 2012: тезисы докл. – г.Черноголовка, 2012. – С. 97.

23. Бондаренко М.О. Оцінка адгезійної міцності на стирання оксидних покриттів на оптичному склі методом атомно-силової мікроскопії / М.О.Бондаренко, Ю.І.Коваленко, І.А.Рева, І.В. Яценко [та ін.] // Приладобудування: стан і перспективи: XII міжнар. наук.-техн. конф., 23-24 квітня 2013 р: тези доп. – м. Київ, 2013. – С. 207.

24. Kovalenko Y.I. Study of ordered oxide patterns got on the dielectric surfaces with the combined electronic technology / Y.I.Kovalenko, M.A.Bondarenko, E.V.Vertsanova, I.V.Iatsenko [etc.] // Physics and technology of thin films and

nanosystems: XIV Intern. conf.: thesis, May, 20-25, 2013. - Ivano-Frankivsk, 2013. – pp. 92.

25. Антонюк В.С. Модифицирование металлизированных поверхностей ленточным электронным потоком / В.С. Антонюк, Ю.И. Коваленко, М.А. Бондаренко, И.В. Яценко // Инженерия поверхности и реновация изделий: XIII Междунар. науч.-техн. конф., 3-7 июня 2013 г: тезисы докл. – г.Ялта-г.Киев, 2013. – С. 15-19.

26. Бондаренко М.А. Изучение механизма формирования ультратонких функциональных покрытий на оптическом стекле при комбинированной электронно-лучевой микрообработке / М.А. Бондаренко, Ю.И. Коваленко, Ю.Ю. Бондаренко, С.А. Билоконь [и др.] // Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов: III междунар. науч. конф., 15-16 мая 2014: матер.докл.– Алматы: Казах университеті, 2014. – С. 64-65.

27. Антонюк В.С., Повышение износостойкости деталей оптического приборостроения / В.С. Антонюк, Ю.И. Коваленко, М.О Бондаренко //”Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте”: Материалы 14-го Международного научно-технического семинара, 24 - 28 февраля 2014 г. Свалява – Киев: АТМ Украины.- 2014. – С. 13 – 17.

28. Гайдаш Р.П. Математичне моделювання в задачах оптимального керування процесом електронно-променевої мікрообробки діелектричних матеріалів / Р.П. Гайдаш, Ю.І. Коваленко, Ю.Ю. Бондаренко // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-технической конференции, 26-29 сентября 2018 г., г. Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2018. – С. 27-29.

29. Коваленко Ю.И. Исследование распределения энергии в зоне действия ленточного электронного потока / Ю.И. Коваленко, В.С. Антонюк, Л.Г. Полонский // 3б. тез доповідей І-ї Міжнародної науково-технічної



конференції “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019”; 13–15 травня 2019 р., – Вінниця : ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. С. 295- 296.

30. Коваленко Ю.І. Експериментальне дослідження адгезійної міцності зносостійких покриттів на оптичних виробках після їх електронно-променевого модифікування / Коваленко Ю.І., Антонюк В.С./ Зб праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 06–09 листопада 2019 р., м. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка» 2019 – С. 123-125.